

Aus dem Institut
für Arbeits- und Sozialmedizin der
Johannes Gutenberg-Universität

Experimentelle Untersuchung zur Belastung
der Wirbelsäule
durch mechanische Schwingungen
bei verschiedenen Fortbewegungsarten

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Würde des Doktors der Medizin
der Johannes Gutenberg-Universität

dem Medizinischen Fachbereich vorgelegt

von

Eberhard Dielmann

Mainz 1983



Aus dem Institut
für Arbeits- und Sozialmedizin der
Johannes Gutenberg-Universität

Experimentelle Untersuchung zur Belastung
der Wirbelsäule
durch mechanische Schwingungen
bei verschiedenen Fortbewegungsarten

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Würde des Doktors der Medizin
der Johannes Gutenberg-Universität

dem Medizinischen Fachbereich vorgelegt

von

Eberhard Dielmann

Mainz 1983

Fachbereichsdekan:

Prof. Dr. Dr. Ketterl

1. Gutachter:

Prof. Dr. H. Dupuis

2. Gutachter:

Prof. Dr. Steeger

Tag der mündlichen Prüfung: - 2. NOV. 1983

INHALTSVERZEICHNIS

	<u>Seite</u>
1. Einleitung	1
2. Aufgabenstellung	2
3. Erkenntnisse aus der Literatur	2
3.1 Einflüsse auf die Wirbelsäule	2
3.1.1 Entwicklungsgeschichtliche Haltungs- änderungen	2
3.1.2 Endogene und exogene Einflüsse	2
3.2 Epidemiologische Aussagen zur Ver- breitung von Wirbelsäulenschäden	3
3.2.1 Krankheitsbilder	3
3.2.2 Prävalenz	9
3.2.3 Volkswirtschaftliche Aspekte	14
3.3 Histologische Untersuchungsergebnisse	16
3.4 Schwingungsbelastung und Schwingungs- beanspruchung	20
3.4.1 Definition von Schwingungsbelastung und Schwingungsbeanspruchung	21
3.4.2 Physikalische Schwingungsbelastung	22
3.4.3 Schwingungsbeanspruchung	26
3.4.3.1 Schwingungsrezeptoren	26
3.4.3.2 Akute Wirkungen	27
3.4.3.3 Chronische Wirkungen	37
3.5 Zusammenfassung	48

4.	Experimenteller Teil	
4.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	49
4.1.1	Versuchspersonen	49
4.1.2	Versuchsaufbau	51
4.1.2.1	Schwingungssimulator (Versuche Nr. 1 - 3)	51
4.1.2.2	Feldversuche (Versuche Nr. 4 - 8)	52
4.1.3	Begründung der Programmauswahl	52
4.1.4	Schwingungsaufnehmer	54
4.1.5	Elektromyographie	59
4.1.6	Meßwagen	61
4.1.7	Versuchsablauf	63
4.2	Versuchsauswertung	65
4.3	Ergebnisse und Interpretation	66
4.3.1	Ergebnisse	66
4.3.2	Diskussion	76
5.	Abschließende Betrachtung	81

Literaturverzeichnis	82
----------------------	----

1. Einleitung

Über die durch physikalische Einflüsse bedingten Wirbelsäulenschädigungen ist in den letzten Jahrzehnten viel geforscht und veröffentlicht worden. Ein Teil der Veröffentlichungen zog seine Erkenntnisse aus Untersuchungen menschlicher und tierischer Wirbelsäulen-Präparate, MESSERER (1880), SONODA (1962), CHRIST und DUPUIS (1966), FASSBENDER (1979).

Andere Arbeiten, die durch Untersuchungen am lebenden Menschen erstellt wurden, bedienten sich oft ungewöhnlich invasiver Methoden, NACHEMSON (1965), (1966), CHRIST und DUPUIS (1963). Sie sind deshalb meist sehr aussagekräftig, durch ihren experimentellen Aufwand aber auch schwer durchführbar. Aus diesem Grund sind Erkenntnisse hinsichtlich der durch physikalische Einflüsse herrührenden Wirbelsäulenschäden aus retrospektiven, epidemiologisch-statistische Reihenuntersuchungen gezogen werden. Diese Aussage gilt auch für die Exposition des Organismus - und besonders der Exposition der Wirbelsäule - gegenüber den mechanischen Schwingungen. Dabei wurden Erkenntnisse bezüglich der Schwingungsbelastung und Schwingungsbeanspruchung bei normalen, alltäglichen Tätigkeiten wie Laufen, Gehen und Springen gewonnen.

Die folgende Untersuchung möchte sich mit einem experimentellen Vergleich der Schwingungsbelastung beider Bereiche des menschlichen Lebens in diejenige Versuche einreihen, die durch Mehrung des Wissens neue und bessere Präventivmaßnahmen finden sollen.



2. Aufgabenstellung

Es bestand die Aufgabe, die Schwingungsbeanspruchung des Menschen im Bereich der Beine, des Rumpfes bzw. der Wirbelsäule unter verschiedenartigen Schwingungsbelastungen zu ermitteln. Hierzu wurden Versuche mit Versuchspersonen unter Schwingungsbelastung durch Arbeitsmaschinen und bei normalen Fortbewegungsarten durchgeführt. Als Meßgrößen dienten dabei das biomechanische Schwingungsverhalten der Wirbelsäule und die elektromyographische Reaktion der Lendenwirbelsäulenmuskulatur. Es wurden physikalische Beschleunigungsmessungen am Sprunggelenk, an der Lendenwirbelsäule und der Halswirbelsäule sowie physiologische elektromyographische Messungen im Bereich der Lendenwirbelsäulenmuskulatur beidseits vorgenommen.

3. Erkenntnisse aus der Literatur

3.1 Einflüsse auf die Wirbelsäule

3.1.1 Entwicklungsgeschichtliche Haltungsänderungen

Im Laufe seiner vorgeschichtlichen Entwicklung änderte der Mensch seine Körperhaltung. Vom horizontalen Vertebraten, dem Vierfüßler, entwickelte er sich zum vertikalen Zweifüßler. Damit ergeben sich für das zentrale Achsenorgan des Körpers, die Wirbelsäule, völlig neue Druckverhältnisse. Denn jetzt liegen Wirbelkörper und Zwischenwirbelscheibe nicht mehr parallel nebeneinander, sondern übereinander und üben einen stetigen Druck aufeinander aus. Die Folgen der Lageänderung der Wirbelsäule, die in Veränderungen der Knochen, Bänder und Muskeln bestehen, sind gewaltigen Ausmaßes

und bedingen die mannigfaltigen Erscheinungsbilder der Wirbelsäulenpathologie.

3.1.2 Endogene und exogene Einflüsse

Man muß allerdings noch andere als entwicklungsgeschichtlich-statische Einflüsse auf die Wirbelsäule berücksichtigen, will man ihre Pathologie ausreichend erklären. Da sind zum einen Einflüsse endogener Natur, die sich z.B. in kongenitalen Mißbildungen, Mineralisationsstörungen, hormonellen Dysregulationen oder altersbedingten Abnutzungsphänomenen manifestieren. Zum anderen sind die exogenen Einflüsse zu berücksichtigen, die sich als unphysiologische Überbelastung z.B. der Schwerarbeiter oder Lastenträger, bei Bergbauarbeitern, Traktoristen und Menschen mit Schreibtischberufen und als verhaltensbedingte Folgeschäden in Form des chronischen Bewegungsmangels oder der Wohlstandsadipositas darstellen. (Weitere Aussagen hinsichtlich exogener und endogener Einflüsse bei Schwingungsbelastung und Schwingungsbeanspruchung sind im Kapitel 3.4 zu finden).

3.2. Epidemiologische Aussagen zur Verbreitung von Wirbelsäulenschäden

3.2.1 Krankheitsbilder

Die Schädigungen des zentralen Achsenorgans finden ihren Ausdruck in manifesten Krankheiten mit den dazu gehörigen Beschwerden. Da vor allem die obere Lendenwirbelsäule, gefolgt von der unteren Halswirbelsäule, von dem degenerativen Verschleiß betroffen wird, ist die Häufigkeitsverteilung der Symptome erklärlich. Es sind dies vor allem Rücken- und Kreuzschmerzen bzw. Verspannungsschmerzen im Hals- und

Schulterbereich, die oft durch ungenügende Diagnostik zusammen mit Ischialgien als dem rheumatischen Formenkreis zugehörige Krankheiten angesehen werden.

Ein besonderes Augenmerk soll hier auf die Krankheitsbilder geworfen werden, die durch mechanische Überbelastung der Wirbelsäule entstanden sind. Mechanische Dauereinwirkungen kommen wegen der zentralen Lage der Wirbelsäule im Stütz- und Bewegungsapparat in beinahe allen Berufen und bei fast allen körperlichen Tätigkeiten vor.

Folgende Krankheitsbilder lassen sich darstellen:

Eine häufige Erkrankung stellt die Adoleszentenkyphose dar. Es handelt sich um Veränderungen, die SCHEUERMANN im Jahre 1921 als Erster beschrieb.

An den Grund- und Deckplatten der Wirbelkörper entstehen Ausbuchtungen, die reihenweise an vielen übereinanderliegenden Wirbelkörper vorkommen können. Es entstehen durch den ventralen Zug des Thorax Keilwirbel mit Zuspitzung nach vorn. Die knötchenartigen Einbuchtungen werden nach ihrem Erstbeschreiber "Schmorl'sche Knötchen" benannt. Das Krankheitsbild kann heftige Beschwerden und Bewegungseinschränkungen verursachen und führt zur zunehmenden Kyphosierung. Als Ursache kommen Wachstumsstörungen in der Peripubertät bei gleichzeitiger körperlicher Belastung, wie z.B. Schulsport, Anforderungen in der Lehrzeit und häufiges gekrümmtes Sitzen in Frage.

Die Dissectio processus spinosi sive transversi - die Abtrennung eines oder mehrerer Dorn- oder Querfortsätze bei mechanischer Überbelastung ist die einzige als Berufskrankheit anerkannte Folge einer mechanisch-beruflichen Einwir-

kung auf die Knochen der Wirbelsäule. Sie wird auch als "Schipper-Krankheit" bezeichnet und trägt in der Berufskrankheiten-Verordnung der BRD vom 1.1.1977 (D-BeKV) die Nummer 2107. Sie wird ebenfalls in der Berufskrankheiten-Verordnung der DDR (DDR-BK) aus dem Jahre 1971 und in der Berufskrankheitenliste der Europäischen Gemeinschaft (EG-BK) vom 4.9.1972 als Berufskrankheit anerkannt.

Am häufigsten sind die langen Dornfortsätze am Hals-Brust-Übergang betroffen, sehr selten die Dornfortsätze der Lendenwirbelsäule, aber etwas häufiger ihre Querfortsätze. Bereits der gebräuchliche Name Schipper-Krankheit deutet auf einen Krankheitsvorgang hin und vermeidet die Gedankenverbindung mit einer plötzlichen, gewaltbedingten Entstehung; es scheint sich um eine Ermüdungskrankheit zu handeln.

Die Spondylolyse bzw. als Folgezustand die Spondylolisthesis (Gleiten der Wirbelkörper) spielt sich fast ausschließlich im Lendenwirbelsäulenbereich ab und es können neben klinisch stummen Verläufen Beschwerdebilder von einfachen Kreuzschmerzen bis zu Caudaschädigungen mit neurologischen Ausfällen vorkommen.

Als Folge von Dauerbelastungen werden von vielen Autoren, FREEMAN (1973), NACHEMSON (1975), Mikrofrakturen, Mikrofrissuren, und sogar Trümmerzonen mit Nekrosen beschrieben. JUNGHANNS (1979) schreibt: "Wahrscheinlich können langwirkende Druckbelastungen und rhythmische, sinusförmige Wechselbelastungen mit hinzukommenden unregelmäßige Stößen und Erschütterungen zu den beschriebenen Veränderungen führen." Die Lokalisation dieser Schädigung liegt im Bereich der Knochenplatte des Wirbelkörpers und der anliegenden hyalinen Knorpelplatte.

Veränderungen an den Gelenken der Wirbelsäule äußern sich meist in Form chronischer arthrotischer Verformung dieser Gelenke. Besonders betroffen sind die Wirbelbogengelenke im Lendenwirbelsäulenbereich, weil viele körperliche Schwerarbeiten ihren Drehpunkt im Lenden-Kreuzübergang haben und weil sowohl über Sitzfläche und Becken eingeleitete sinusförmige Dauerbelastungen als auch stochastische Erschütterungen gerade in diesem Bereich konzentriert wirken. Diese Aussage trifft GROHER (1969 und 1974) nach Untersuchungen von jugendlichen Wasserspringern und Trampolinturnern. Die Frage der Berufskrankheit kann mangelhafter epidemiologischer Untersuchungsergebnisse wegen noch nicht entschieden werden.

Von Veränderungen der Bandscheibe, des Discus intervertebralis wird fast jeder Mensch zwischen dem zwanzigsten und vierzigsten Lebensjahr betroffen, BENNINGHOFF/GOERTTLER (1979). Als häufigste Sonderform der Bandscheibenstörung nimmt hier die Spondylosis deformans, die Knochenzackenkrankheit, einen besonderen Platz ein. JUNGHANNS (1931) errechnet aus 4.000 pathoanatomisch untersuchten Wirbelsäulen folgende Zahlen:

Bis zum 35. Lebensjahr waren bei beiden Geschlechtern in 40 %, bis zum 50. Lebensjahr bei Männern 80 %, bei Frauen 60 %, bis zum 60. Lebensjahr bei Männern 90 %, bei Frauen 80 % Veränderungen im Sinne der Spondylosis deformans nachzuweisen. Es handelt sich um eine Folge der degenerativen Veränderungen der Zwischenwirbelscheibe, die zu einer Instabilität im intervertebralen Bewegungssegment und zu einer knöchernen Randzackenbildung an den Ansatzstellen des vorderen Längsbandes führt. Als häufigste Ursache für den Initialschaden, nämlich den Verschleiß der Bandscheibe, kommen

als mechanische Überbelastung neben Dauerfehlhaltungen der Wirbelsäule auch Vibrationsbelastungen in Frage.

Über die Ganzkörperschwingungen wird in der Berufskrankheitenliste der EG (E 5) unter Bezugnahme auf die einwirkenden großen Amplituden der Arbeitsmaschinen, das Resonanzverhalten der Maschinen, seitlich einwirkender Kräfte und extremer Muskelarbeit bemerkt: " Die Knochen- und Gelenkschäden finden sich fast ausschließlich an der Wirbelsäule. Sie entstehen durch das Zusammendrücken der Wirbelsäule. Meist sind diese Schäden im Bereich der Brust- und Lendenwirbelsäule lokalisiert, sie finden sich aber auch an der Halswirbelsäule." (Weitere Hinweise auf diese Problematik finden sich im Kapitel 3.4.3.3.).

Als Berufskrankheit werden nach der Berufskrankheitenverordnung der BRD (Nr. 2201) die Druckfallschäden in den Wirbelknochen anerkannt (Morbus Caisson). Durch die eintretende Dekompression bei aus großer Tiefe schnell zur Oberfläche kommenden Tauchern, entstehen Stickstoffblasen und es kommt zu multiplen Arterienverschlüssen. Bei Tauchern ist deshalb der Knocheninfarkt als Berufskrankheit anerkannt, EDER/GEDIGK (1975). WÜNSCHE und SCHEELE (1974), (1976), fanden bei Reihenuntersuchungen an Albinoratten, die wiederholten Überdrucksituationen mit nachfolgender Dekompression ausgesetzt waren, Sklerosierungen der Wirbelkörperdeckplatten, Höhenzunahme der Bandscheibenräume sowie Einbrüche und Einbuchtungen der Wirbelkörper-Deckplatten.

BAASTRUP beschrieb 1933 erstmalig die interspinale Neoarthrose. Infolge der übermäßigen Lendenlordose beim Tragen schwerer Lasten vor dem Körper (z.B. Bierfaßträger) erfolgte eine Schädigung des Ligamentum interspinosum und nachfolgend

die schmerzhafteste Nearthrose (kissing spines) der processus spinosi, vornehmlich im Bereich der Lendenwirbelsäule.

Die Erkrankungen der Muskel- und Sehnenansätze, die durch funktionelle Überlastung entstehen, finden ihren häufigsten Ausdruck in Krankheitsbildern wie der Epicondylitis, der Styloiditis und der Periostitis. An der Wirbelsäule sind die vorspringenden Enden der Dorn- und Querfortsätze bevorzugter Sitz der schmerzhaften Erkrankung, für die hier der Name Akroosteopathie verwendet wird. Es handelt sich um eine Gewebsermüdung des hyalinen Widerlagers. Durch die Überbelastung erfahren die Sehnen Ein- und oft sogar Abrisse mit der Folge schmerzhafter Funktionseinschränkung.

Um als Berufskrankheit anerkannt zu werden, muß die Krankheit nach D-BeKV, Nr. 2101: "zur Unterlassung aller Tätigkeiten gezwungen haben, die für die Entstehung, die Verschlimmerung oder das Wiederaufleben ursächlich waren oder sein können."

Die Frage nach dem Anteil der beruflichen Schädigung bei der Adoleszentenkyphose, bei Skoliosen und Kyphosen, bei den weitverbreiteten Osteoporosen und Osteosklerosen ist noch nicht abschließend geklärt.

Die Mehrzahl der Autoren tendiert dazu, endogene Ursachen anzuschuldigen und der beruflichen Belastung lediglich einen zusätzlich schädigenden Einfluß zuzugestehen, LOUYOT et al. (1956), TSUJI und TAMAKI (1978), JUNGHANNS (1979).

3.2.2. Prävalenz

Wie alle Organe bzw. Organsysteme hat auch die Pathologie der Wirbelsäule multifaktorielle Ursachen. Neben allgemeinen Ernährungsursachen und Stoffwechselstörungen, Infektionskrankheiten, Tumormetastasen, Intoxikationen (Fluor, Phosphor, Cadmium) gehören die mechanischen Dauerbelastungen zu den wichtigsten Ursachen der Wirbelsäulenerkrankungen.

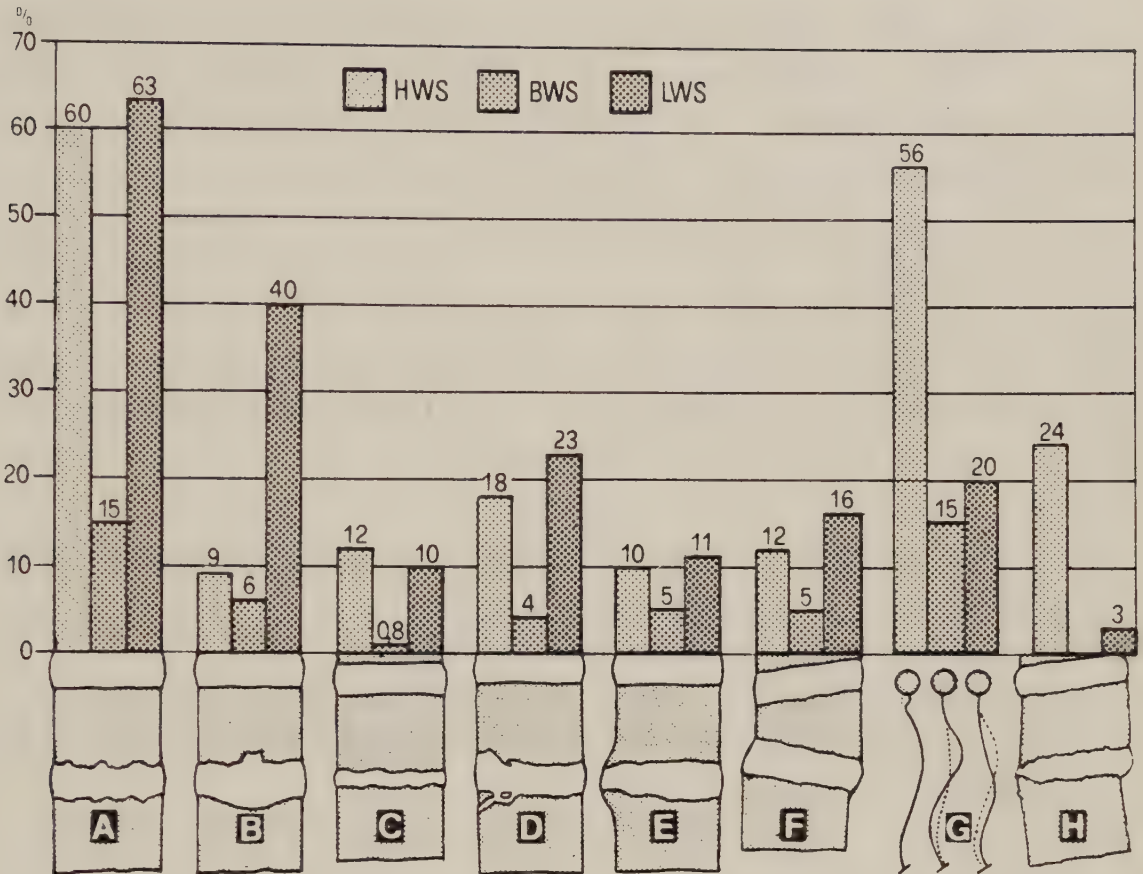
In der Morbidität der arbeitenden Bevölkerung liegen die Krankheiten des Stütz- und Bewegungsapparates etwa in der gleichen Größenordnung wie die Erkrankungen der Atmungsorgane. Auf beide Krankheitsgruppen entfallen je ca. 20 % der Arbeitsunfähigkeitstage.

Wie groß allerdings die Schwierigkeiten für vergleichend-statistische Aussagen sind, zeigt die von CREMONA (1972) veröffentlichte Tabelle über die Häufigkeit von Wirbelsäulenveränderungen. Ursache für die breite statistische Streuung sind die Unterschiedlichkeit des Untersuchungsgutes, das Fehlen pathoanatomischer Aussagen, das Fehlen von Röntgenbildern, die vor dem Krankheitsbeginn angefertigt wurden, sowie die verschiedenen Beurteilungsgrundlagen - je nach Autor wird z.B. der körperliche Untersuchungsbefund oder aber angegebene Beschwerden zugrunde gelegt. Erschwerend kommt dann auch noch eine störende Ungleichheit der Nomenklatur hinzu.

Wirbel- säulen- Veränderung	Autoren Fallzahl	Runge 4654	Linde- mann 4291	De Séze 1.000	Le Go 4161	Fargeot 100	Foehr 684	Cremona 5580
Anomalien		32,00	43,00	5,50	25,40	36,00	-	-
Spina bifida		3,09	11,00	-	-	-	24,00	0,74
Beschwerden an								
LWS-Kreuzbein-Übergang		6,16	7,70	-	15,71	11,00	11,00	8,76
Spondylosysis/ Spondylolisthesis		2,08	1,04	3,80	-	5,00	4,00	10,36
Diskopathie		2,53	-	0,4	-	-	11,00	-
Arthrose		19,20	17,50	-	-	-	39,00	28,76
Statische Beschwerden		2,32	-	0,90	5,85	0,90	65,00	18,41
Adoszentenkyphose		0,81	0,40	0,50	-	0,50	82,00	2,78

Tabelle 1: Häufigkeit von Veränderungen der Wirbelsäule nach einer Zusammenstellung von CREMONA (1972)

Die Häufigkeit von Wirbelsäulenveränderungen im Röntgenbild gibt die Abb. Nr. 1 von JUNGHANNS an, die nach einer von ROSS (1962) veröffentlichten Abbildung modifiziert wurde.



- A = Unregelmäßige Wirbelkörperabschlußplatten
- B = Einzelner Schmorl-Knoten (oben), Einbuchtung der Wirbelkörperabschlußplatte
- C = Höhenverminderung der Bandscheibe
- D = Unregelmäßigkeiten vorderer Wirbelkörperkanten
- E = Knöcherne Randlippen
- F = Keilwirbel
- G = Kyphose, Brustkyphose mit ausgleichender Lordose, Flachrücken
- H = Wirbelverschiebung

Abbildung 1: Verschiedene häufige Veränderungen in Röntgenbildern Jugendlicher (Neuzeichnung in Anlehnung an eine Abbildung von ROSS (1962))

Nahezu die Hälfte aller Jugendlicher weist röntgenologisch nachweisbare Veränderungen im Sinne einer Scheuermann'schen Erkrankung auf.

CHRIST und DUPUIS (1968) fanden bei der Untersuchung jugendlicher Landwirte 51,5 % schwerwiegende Befunde von Adoleszentenkyphose.

ROSS (1962) untersuchte die Wirbelsäulen von 5.000 beschwerdefreien Jugendlichen im Alter zwischen 15 und 22 Jahren röntgenologisch. Es handelt sich um Tauglichkeitsuntersuchungen für den Polizeiberuf.

Er fand bei

- 7,2 % schwere Wirbelsäulenveränderungen
- 27,6 % mittelschwere Wirbelsäulenveränderungen
- 53,6 % leichte Wirbelsäulenveränderungen.

Lediglich bei 31,6 % bestanden keine pathologischen Befunde.

Bei dieser Häufigkeit der Adoleszentenkyphose ist es verständlich, daß ein hoher Prozentsatz der späteren Chondrosen und Osteochondrosen damit in Zusammenhang gebracht wird G-SCHWEND (1972).

Ähnlich wie die Adoleszentenkyphose kommen auch die wuchsbedingten Skoliosen bereits in früher Jugend vor. Ihre durchschnittliche Häufigkeit wird mit 30 % angegeben, NÖH und BEHNECKE (1975).

Die Frage, ob langfristig wirkende statische und dynamische Dauerbelastungen, wie sie bei bestimmten Berufsgruppen nicht zu vermeiden sind, so nachhaltige Schäden an der Wirbelsäule hervorrufen können, daß von einer spezifischen Berufskrankheit gesprochen werden kann, ist sehr schwer zu beantworten. Im Bestreben diese Frage zu klären, hat eine große Zahl von Autoren vergleichende Untersuchungen bei Arbeitern, die einer gewissen mechanischen Dauerbelastung unterworfen waren, durchgeführt. Die Ergebnisse wurden meist mit einem durchschnittlich belasteten Kollektiv verglichen. Dabei zeigte sich, daß die Wirbelsäule der beruflich mehr exponierten

Untersuchungspersonen eine höhere Morbidität aufwies als das Kontrollkollektiv.

Eine vergleichende Aufstellung über den Gesundheitszustand in verschiedenen Berufszweigen der Forst- und Bauwirtschaft liegt von der Gesundheitsorganisation der schwedischen BYGG-HÄLSAN vor. An erster Stelle stehen dabei die Wirbelsäulenerkrankungen und zwar die wirbelsäulenbelastenden Berufe mit deutlich höherer Morbiditätsrate als die weniger belastenden Tätigkeiten.

So waren von	3.000 untersuchten Betonarbeitern	16	%
von	500 untersuchten Maurern	14,5	%
von	462 untersuchten Malern	14	%

an Wirbelsäulenbeschwerden erkrankt.

Dagegen fand man

bei 1.000 untersuchten Angestellten nur bei 7,2 %

bei 108 untersuchten Elektrikern nur bei 7,0 %

der Probanden Wirbelsäulenbeschwerden. Bei vielen Untersuchten bestanden außerdem Kopfschmerzen und Migräne, die zum großen Teil durch eine degenerativ veränderte Halswirbelsäule bedingt sein dürften. Eine Untersuchung von Bergleuten durch CAPLAN et al. (1966) ergab 8,9 % und durch GURIN (1971) 8,4 % Spondylolysen bzw. Spondylolisthesen.

SCHLEGEL (1978) gibt bezüglich der Spondylolyse bzw. der Spondylolisthesis bei der europäischen Bevölkerung eine Häufigkeit von 5 - 7 % an.

KELSY und HARDY stellten 1975 fest, daß Männer, die etwa die Hälfte ihrer Berufszeit Kraftwagen fahren, 3mal häufiger an

Bandscheibenvorfällen leiden als solche, die beruflich keine Kraftwagen bedienen.

Große Aufmerksamkeit wird der Frage nach dem krankmachenden Einfluß von Vibrationen gewidmet. Da in vielen Berufen Kontaktvibrationen bestehen, sind die Gefahrenquellen für die Wirbelsäule weit verbreitet (Einzelheiten über Ergebnisse epidemiologischer Untersuchungen exponierter Personengruppen siehe 4.3.3).

Die meisten der Schädigungen sind Folge eines jahrelangen Arbeitslebens. Für den begutachtenden Arzt stellt sich das Problem der Gewichtung. Das Kollektiv der arbeitenden Menschen im fortgeschrittenen Lebensalter stellt bereits eine Auslese an besonders gesunden Individuen dar, da diejenigen Arbeitnehmer, die schon frühzeitig an irgendwelchen Beschwerden im Bereich der Wirbelsäule erkrankt sind, meist die belastende Tätigkeit aufgeben und eine Umschulung vorgenommen haben. Zudem zeigt sich, daß nur in wenigen Fällen objektive Anfangsbefunde aus Zeiten vor dem Erkrankungsbeginn vorliegen. Deshalb ist es für den ärztlichen Gutachter mit großen Unsicherheitsfaktoren verbunden, wenn er eine ätiologisch unanfechtbare Aussage bezüglich einer durch Arbeitseinflüsse bedingten Wirbelsäulenerkrankung machen soll.

3.2.3. Volkswirtschaftliche Aspekte

Die Wichtigkeit der Wirbelsäulenerkrankungen läßt sich nicht zuletzt an den Ausfällen ermessen, die sie volkswirtschaftlich verursachen. So berichtet EBERSBACH (1976) darüber, daß die Pflichtversicherten der allgemeinen Ortskrankenkassen der BRD im Jahre 1973 200 Mill. Arbeitsunfähigkeitstage aufzuweisen hätten. Davon entfallen 37,8 Mill. Ausfallstage

auf Krankheiten des Stütz- und Bewegungsapparates. Das entspricht ca 20 % aller Arbeitsunfähigkeitstage. Damit liegt dieser Krankheitskomplex mit seiner Morbiditätsrate vor anderen Diagnosegruppe wie z.B.

Unfälle	mit $31,2 \times 10^6$	Ausfallstage,
Verdauungskrankheiten	mit $30,6 \times 10^6$	Ausfallstage,
Kreislaufkrankheiten	mit $22,5 \times 10^6$	Ausfallstage,
Geschwulstkrankheiten	mit $4,4 \times 10^6$	Ausfallstage.

ELLWANGER (1973) berichtet auf der 8. Arbeitstagung der Gesellschaft für Wirbelsäulenforschung, daß in der Arbeiterrentenversicherung im Jahre 1972 für Wirbelsäulenleiden und ihre zusätzlichen Symptome 31,2 % aller Heilverfahren und 46,95 % der Berufsförderungsmaßnahmen durchgeführt wurden.

Auch die Notwendigkeit zu Berufsförderungs- bzw. Umschulungsmaßnahmen verursacht Kosten, die volkswirtschaftlich deutlich zu Buche schlagen. Im Berufsförderungswerk Dortmund betrafen von den Krankheiten des Stütz- und Bewegungsapparates 66,9 % Wirbelsäulenleiden. Im Berufsförderungswerk Michaelshofen befanden sich 1977 von 550 Rehabilitanten fast 50 % wegen eines Wirbelsäulenleidens in der beruflichen Umschulung.

In diesem Bereich ist ein reiches Betätigungsfeld für die präventive Arbeitsmedizin vorgegeben, da es wünschenswert wäre, frühzeitig und nicht erst nach einem mißglückten Berufsversuch helfend einzugreifen.

3.3. Histologische Untersuchungsergebnisse

Den klinisch manifesten Krankheitsbildern der Wirbelsäule liegen histologische Gewebsveränderungen zugrunde. Zu unterscheiden sind vor allem drei Bereiche, in denen pathologische Prozesse stattfinden:

- Veränderungen an der Knochensubstanz
- Veränderungen an der Zwischenwirbelscheibe
- Veränderungen an den Ansatzstellen der Sehnen und Muskeln sowie an Sehnen- und Muskelgewebe selbst.

Der Knochen unterliegt auch im Bereich der Wirbelsäule Veränderungen, die nahezu jeden Menschen betreffen. Es handelt sich um die Osteoporose, eine Folge des mangelhaften Angebotes von Eiweiß und Calcium, so daß bei gleichbleibender Osteoklastenfunktion eine Verdünnung der Corticalis und Spongiosabälkchen erfolgt bei gleichzeitiger Vergrößerung des Markraumes. Die Osteoporose ist durch die Abnahme der Knochendichtigkeit im Röntgenbild gut zu erkennen und häufigste Ursache der Schenkelhalsfraktur im Alter, EDER/GEDIGK (1975).

Die Osteoporose ist auch der Grund für die verminderte Druckbelastungsfähigkeit der Wirbelknochen; Deckplatteneinbrüche und Wirbelkörpersinterungen sind als Folge anzusehen.

Knochen, die im Tierexperiment Ganzkörpervibrationen ausgesetzt waren, zeigten eine Zunahme der nicht organischen Bestandteile. Sie wurden brüchig und mürbe.

Im histologischen Präparat traten unregelmäßige Verkalkungen der aktiven Mineralisationszonen sowie eine Unterbrechung der Verkalkung der organischen Knochengrundsubstanz auf. Daß

die Vibrationsexposition Veränderungen der Knochen nach sich zieht, zeigt FASSBENDER (1977 - 1979). Er beschreibt die lichtoptisch untersuchten Präparate von Ratten, die acht Wochen einer Dauervibration ausgesetzt waren.

Bei den Wirbelkörpern sind die Knochenbälkchen regulär strukturiert. Dazwischen läßt sich reichlich blutbildendes Knochenmark erkennen. Die an die Markhöhle angrenzende Zona spongiosa ist asymmetrisch dick. Die ventrale Seite wird von großteils unauffälligem Knorpel überkleidet, der jedoch auf einer Seite Einrisse zeigt. Im ventralen Areal ist die quer-verlaufende Knorpelschichtung nicht erhalten. Die säulenförmige Anordnung der Knorpelzellen entlang der Knorpel-Knochen-Grenze ist in diesem Bereich, der sich auch stark basophil anfärbt, gestört. Das Knochenmark ist durchsetzt von Blutbildungszellen, die Knochenmatrix ist unauffällig.

Da diese Veränderungen den üblichen Zeichen des Alterns entsprechen, ist die Aussage zulässig, daß durch die mechanischen Schwingungen ein vorzeitiger Altersprozeß eingeleitet wird. JANKOVICH (1971) wies allerdings darauf hin, daß bisher nur Röhrenknochen obigen Experimenten unterworfen wurden. Der Beweis für die vibrationsbedingte Wirbelsäulen-Osteoporose muß noch erbracht werden.

Die physiologische Schwachstelle im System Wirbelsäule stellen die Zwischenwirbelscheiben dar. (Bezüglich der Pathogenese und der Pathomechanismen vergleiche Kapitel 3.4.4 bis 4.6.)

FASSBENDER (1977 - 1979) beschreibt histologische Veränderungen an Knorpel, Knochen und Synovialgewebe nach Dauervibrationsexposition. Er versucht im Tierexperiment die Frage zu klären, inwieweit Dauervibrationen in der Lage sind, Ver-

änderungen am Gelenkknorpel zu verursachen, die als Initialschäden für spätere Arthrosen gelten können.

Bei Ratten, die wochenlang Dauervibrationen unterworfen wurden, stellte er im Elektronenmikroskop fest, daß die Filamente in den Chondrocyten durch vermehrte Bildung von Zellorganellen verdrängt wurden. Es hatte sich ein ausgedehntes Golgi-Feld und vermehrt rauhes endoplasmatisches Retikulum gebildet. Es lassen sich mehr Mitochondrien in den Chondrocyten nachweisen.

Diese Veränderungen sind progressiver Natur und entsprechen der vermehrten Beanspruchung der Zellen. Gleichzeitig lassen sich jedoch auch Zellfragmente zugrunde gegangener Chondrocyten nachweisen, die als regressive Veränderungen zu interpretieren sind.

Dieser Befund bedeutet, daß eine Erhöhung der Syntheseleistung im Sinne vermehrter Proteoglykan- und Glykoproteidbildung stattfindet, daß jedoch trotz großer Energie- und Stoffumsätze weniger Grundsubstanz synthetisiert werden kann als abgebaut wird. Der Untergang der Knorpelzellen im reifen Knorpelgewebe ist aber sehr ungünstig, da die ausdifferenzierten Chondrocyten nicht teilungsfähig sind, d.h. das beschädigte Knorpelgewebe regeneriert sich nicht FASSBENDER (1977 - 1979).

WITT (1980) untersuchte die vibrationsbedingten Wirbelsäulenschäden bei Hubschrauberpiloten. Dabei arbeitete er als tierexperimentelle Paralleluntersuchung die Wirbelsäulenpräparate von vibrationsexponierten Meerschweinchen histologisch im Lichtmikroskop auf. Es wiesen in direkter Proportionalität zur Vibrationsexposition besonders die Knorpelschichten der Wirbelbogengelenke deutliche Defekte auf. Im

Gelenkspalt befand sich reichlich fibrinöses Exsudat. Es war teilweise stark verschmälert. Die Knorpeloberfläche war mehrfach defekt. Die zellulären Elemente waren reaktiv vermehrt. Eine scharfe Begrenzung der Tangentialschicht lag in weiten Knorpelbezirken nicht mehr vor. Der Knorpel war herdförmig aufgelockert, die Chondrocyten reduziert. Neben regelrecht erscheinenden Zellkernen tauchten pyknotische Kerne auf, die im Sinne der regressiven Veränderungen von FASSBENDER zu werten sind. Die Knorpeloberfläche war unregelmäßig durch Buchten und Einrisse unterbrochen. Der Autor fand bei seinen Untersuchungen keine histologischen Veränderungen der Disci intervertebrales, was bei der relativ kurzen Expositionsdauer von 150 Stunden allerdings verständlich ist.

Auch im Weichteilgewebe erfolgt eine reaktive Vermehrung der Zellorganellen. Vor allem die Mitochondrien nehmen an Zahl zu. Dies ist durch den experimentell bedingten Energiemehrbedarf zu erklären. Die histochemische Anfärbung läßt Glykogenanreicherungen in den Mitochondrien erkennen.

Die Zelle muß bei Sauerstoffmangel durch Überbelastung den anaeroben Weg der glykolytischen Energiegewinnung einschlagen und bildet deshalb einen Vorrat an intramitochondrialem Glykogen.

Die Abbauvorgänge unter Vibrationsbelastung dokumentieren sich in Degenerationsformen, wie z.B. der vielen in Auflösung begriffenen Mitochondrien. Als Träger der wichtigsten Atmungsenzyme und somit als Energiequelle und Auslöser der Muskelkontraktion sind sie nicht in der Lage, der durch Vibration erzeugten Dauerreizung standzuhalten, FASSBENDER (1977 - 1979).

WITT (1980) beschreibt bei den histologischen Untersuchungen von Muskelpräparaten der Paravertebralmuskulatur vibrations-exponierter Meerschweinchen ebenfalls Nekrobiosen teilweise homogenisierter Muskelzellen, denen die typische Querstreifung verloren gegangen ist.

Diese Beobachtungen treffen allerdings erst auf die Versuchstiere zu, die länger als 150 Stunden vibrationsexponiert waren. WITT vermerkt ausdrücklich, daß bei kürzerer Beanspruchung der Muskelzellen keine Veränderungen zu bemerken sind.

3.4. Schwingungsbelastung und Schwingungsbeanspruchung

In der Liste der Berufskrankheiten (Bundesgesetzblatt I, S. 3329) werden in dem Kapitel "Durch physikalische Einwirkungen verursachte Krankheiten" bekannte Krankheitsbilder, wie z.B. Sehnenscheidenerkrankungen, Meniskusschäden, Drucklähmung der Nerven, periphere Durchblutungsstörungen der Extremitäten aufgezählt. Als eine der belastenden physikalischen Einflußgrößen werden die mechanischen Schwingungen bezeichnet. Als Pathomechanismen werden sowohl rein mechanische als auch nerval-vasculäre Vorgänge vermutet. Neben den vorwiegend die Extremitäten betreffenden Schädigungen findet sich in der Liste der Berufskrankheiten allerdings noch kein Hinweis auf Schädigungen durch Vibrationen im Bereich der Wirbelsäule (siehe 4.3.3).

(Die Begriffe "mechanische Schwingungen", "Vibrationen" bzw. "Erschütterungen" werden sowohl im diesbezüglichen Schrifttum als auch in den folgenden Ausführungen als Synonyma verwendet.)

Die Beziehung zwischen Schwingungsbelastung als exogenem Einfluß einerseits und Schwingungsbeanspruchung als den individuellen Voraussetzungen bzw. endogenen Einflüssen andererseits läßt sich aus folgendem Schema erkennen:

<u>Schwingungsbelastung</u>	<u>Mensch</u>
Amplitude	Individuelle Voraus-
Dauer	setzungen
Frequenz	Konstitution
Stoßhaltigkeit	Disposition
Ruhelage	Körperhaltung bei
	Schwingungsexposition
	Endogener Zustand der WS

Schwingungsbeanspruchung
des Menschen

Die Schwingungsbeanspruchung resultiert also aus den physikalisch meßbaren äußeren Schwingungsbelastungen und den physiologischen Anlagen und Reaktionen des belasteten Individuums.

3.4.1 Definition von Schwingungsbelastung und
Schwingungsbeanspruchung

Als Schwingungsbelastung werden von außen auf den Menschen einwirkende, an der Einleitungsstelle zu messende Schwinggrößen definiert.

Unter Schwingungsbeanspruchung dagegen versteht man Auswirkungen der Schwingungsbelastung auf den menschlichen Körper, die sich als Belästigung, akute physiologische Reaktionen, Leistungsminderung und Gesundheitsschädigungen äußern können.

3.4.2. Physikalische Schwingungsbelastung

Will man einen Zustand mit nachteiligen Folgen für den Menschen beseitigen oder mindern, so muß man als erstes die schädigenden Einflüsse analysieren und definieren. Das gilt auch für die mechanischen Schwingungen. GUIGNARD (1971) definiert Schwingungen wie folgt: "Vibrationen sind fortdauernde strukturelle Bewegungen fester Körper, die auf den menschlichen Körper übertragen und durch andere Sinne als das Gehör wahrgenommen werden."

JUNGHANNS (1979) hebt als das Charakteristikum der Vibrationen hervor, daß es sich um die Schwankung einer mechanischen Größe um einen Ruhewert handelt.

SCHÄFER (1982) beschreibt Vibrationen als eine um eine Bezugsebene zeitabhängig schwankende Größe.

Die Unterscheidung der Schwingungen ist anhand ihrer Eigenschaften möglich.

Die Amplitude (a), die Frequenz (f), die Schwingungsdauer (T), auch Periode genannt, charakterisieren eine Schwingung. Desweiteren teilt man Schwingungen in "gleichförmige oder periodische" und "ungleichförmige oder stochastische" Schwingungen ein.

Die Amplitude (a) ist als Scheitelwert x bzw. als maximaler Augenblickswert definiert. Die Dimension wird in "m", "m/sec²" angegeben.

Die Frequenz (f) wird als Anzahl der Perioden pro Zeiteinheit bzw. Kehrwert der Periodendauer T definiert. Die Dimension wird in 1/sec oder Hz angegeben.

Die Periodendauer T ist die Zeit, in der eine einzelne Schwingung bzw. Periode abläuft. Die Periodendauer entspricht somit der Schwingungsdauer. Die Dimension wird in sec. angegeben.

Periodische Schwingungen sind vollständige unmittelbare Wiederholungen eines Schwingungsvorganges x nach einer bestimmten Zeit.

Eine Sonderform der periodischen Schwingungen sind harmonische Schwingungen. Sie sind durch eine Sinus- oder Cosinusfunktion beschreibbar.

Stochastische Schwingungen sind nichtperiodische, dem Zufall unterworfenen regellosen Schwingungen. Es kommen unregelmäßige Beschleunigungsspitzen vor, die bei einer Beurteilung nur statistisch erfaßt werden können. Diese Schwingungsart trifft man bei der Schwingungsbelastung durch Motorfahrzeuge an.

Die Schwingungen sind hinsichtlich ihrer Wirksamkeit in Frequenzbereiche einteilbar

0,1 -	1 Hz	entspricht dem Bereich der Kinetosen
1 -	80 Hz	entspricht dem Bereich der Ganzkörper-schwingungen
16 -	1.000 Hz	entspricht dem Bereich der Hand-Arm-schwingungen.

Die frequenzbewertete Schwingstärke "K" gibt den Zusammenhang zwischen meßbarer Schwingungsbelastung einerseits und subjektiver Wahrnehmung, biomechanischem Schwingungsverhalten und bestimmten physiologischen Veränderungen andererseits an.

Sie entspricht der Wahrnehmungsstärke K, dem K-Wert.

Zur Beschreibung, Messung und Bewertung von Ganzkörperschwingungen in verschiedenen Richtungen ist das dreidimensionale Koordinatenkreuz nach VDI 2057 wie folgt festgelegt:

X - Achse	dorso-ventrale Achse
y - Achse	latero-laterale Achse
z - Achse	caudo-craniale Achse

Fahrzeug/Arbeitsplatz	Bewertete Schwingstärke ¹⁾ K
PKW	4 - 15
Krankenwagen ²⁾	4 - 25
LKW (Straße)	4 - 18
LKW (Baustelle)	14 - 28
Omnibus	8 - 16

Landwirtschaftl. Schlepper	9 - 25
Radlader	10 - 48
Kettenplaner	6 - 26
Grader	19 - 32
Raddozer	12 - 44
Bagger	6 - 22
Walzen	6 - 34
Gabelstapler	8 - 40
Schmiedemanipulatoren	5 - 15

Brückenkrane	2 - 16
Schienenkrane	1 - 5
Rangierlokomotiven	4 - 14
Güter- u. Personenzuglokomotiven	6 - 12

gepanzerte Kettenfahrzeuge	30 - 70

Schiffe - Mannschaftsräume	10 - 14
Überwachungsräume	4 - 7
Wohnbereiche	4

1) Orientierungswerte, nicht gültig für extreme Bedingungen

2) Bewertete Schwingstärke K

Tabelle 2: Bewertete Schwingstärke in Fahrzeugen, auf fahrbaren Arbeitsmaschinen und auf Schiffen
Tabelle nach SCHÄFER et al. (1982)

Beispiele von K-Werten an verschiedenen Arbeitsplätzen zeigt Tabelle 2. Ihr ist zu entnehmen, daß auf Straßenfahrzeugen die Schwingungsbelastung relativ gering ist. Die K-Wertangabe bei Krankenwagen bezieht sich auf den liegenden Patienten in vertikaler Richtung (x-Achse). Bei Baumaschinen wie Radladern, Kettenplanern und Baggern muß im allgemeinen mit relativ hohen K-Werten in z-Richtung gerechnet werden. Dies gilt ebenso für Baustellen-LKW's, landwirtschaftliche Maschinen u.ä.. Extreme Belastungen finden sich bei gepanzerten Kettenfahrzeugen.

Die Schwingungsexpositionszeiten an normalen Arbeitsplätzen liegen in der Regel in Größenordnungen von acht Stunden pro die. Beachtenswert sind daher Arbeitsplätze, bei denen Menschen wesentlich längeren Expositionszeiten ausgesetzt sind wie z.B. auf großen Seeschiffen. Hier sind besonders große Belastungen und Beanspruchungen zu erwarten.

3.4.3 Schwingungsbeanspruchung

3.4.3.1 Schwingungsrezeptoren

Der Mensch verfügt über die Fähigkeit, sich verschiedenen Umweltbedingungen anzupassen. Er besitzt zu diesem Zweck physiologische Regelsysteme, die die Abwehrbereitschaft des Körpers auslösen. Leider gilt das für die Vibrationsabwehr nur in eingeschränkten Maße. Der Grund dafür ist das Fehlen eines speziellen Vibrationssinnesorgans. Die Erschütterungen werden durch Mechano-Rezeptoren der Haut und durch sensible Afferenzen weitergeleitet.

H. LEONHARDT (1974) beschreibt zwei Arten von Rezeptoren:

- a) "Die Merkel'schen Tastscheiben sind helle Zellen in den Basalschichten des mehrschichtigen Plattenepithels ... ein Axon kann mehrere Tastscheiben versorgen."

Sie liegen also intraepidermal.

- b) "Die Meissner'schen Tastkörperchen liegen unter der Epidermis in den Papillen des Coriums. Eine Nervenfaser (dendritisches Ende einer pseudounipolaren Nervenzelle) versorgt mehrere Körperchen."

H CASPERS führt in W.D. KEIDEL (1975) wie folgt aus: "Die nervöse Versorgung der spezifischen Mechanorezeptoren erfolgt über dicke markhaltige Nervenfasern der Gruppe A_β . Der adäquate Reiz für die Mechanorezeptoren besteht in Biegun- und Scherkräften, die ein räumliches Druckgefälle in der Haut erzeugen."

Neben diesen peripheren Rezeptoren hat der Vestibularapparat mit den rechtwinklig zueinander angeordneten Bogengängen eine wichtige Funktion bezüglich der Lagerezeption des Kopfes.

3.4.3.2 Akute Wirkungen

Die akuten Wirkungen der Schwingungsbeanspruchung sind die unmittelbar feststellbaren Reaktionen, die chronischen Wirkungen der Schwingungsbeanspruchung, die nach längerer Expositionszeit feststellbaren gesundheitlichen Schäden.

Die in der folgenden Untersuchung gemessenen Reaktionen entsprechen also ausnahmslos akuten Wirkungen.

Als eine akute Reaktion ist das biomechanische Schwingungsverhalten des Körpers zu bezeichnen.

Die eingeleiteten Schwingungen regen den Gesamtkörper oder Teile von ihm zu Eigenschwingungen an. Resonanzen führen aber zu besonders starker mechanischer Beanspruchung.

Die bisher bekannten Daten über das schwingungsmechanische Verhalten des Körpers in stehender oder sitzender Haltung sind experimentell ermittelt worden. Als besonders aussagekräftig erwies sich hier die Röntgen-Kinematographie. Dabei konnte sowohl das Schwingungsverhalten der inneren Organe als auch das der Wirbelsäule untersucht werden, DUPUIS (1969).

Es handelt sich beim menschlichen Körper um ein kompliziertes elastisches biomechanisches System mit verschiedenen wirksamen Massen, Federkennwerten und Dämpfungseigenschaften.

Die Abbildung Nr. 2 zeigt, daß sich für die Vertikalschwingungen des Rumpfes und des Kopfes beim sitzenden Menschen zwischen 4 und 6 Hz eine Resonanzspitze ergibt.

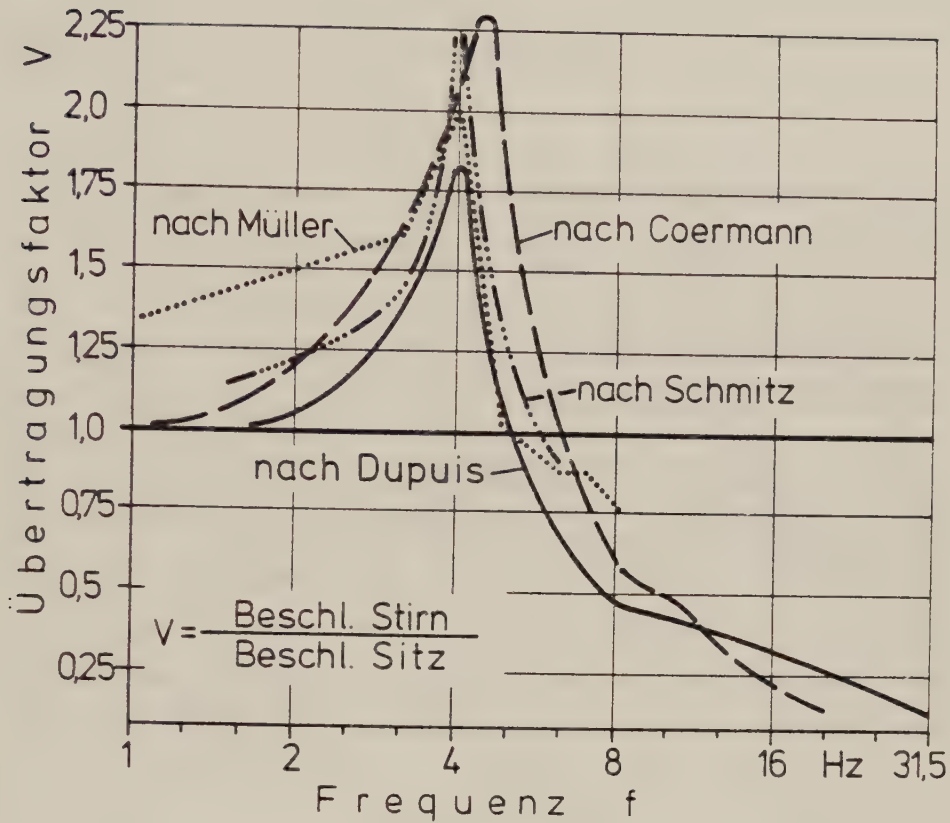


Abbildung 2: Biomechanisches Schwingungsverhalten des Rumpfes und des Kopfes im Sitzen nach DUPUIS (1969)

Abbildung Nr. 3 stellt die relativen Schwingwegveränderungen der Einleitungsstelle am Sitz gegenüber der Halswirbelsäule und der Lendenwirbelsäule dar. Da die Schwingwege der Halswirbelkörper sich bei Frequenzen kleiner 1,5 Hz gegenüber dem Sitz vermindern, ist nachgewiesen, daß der menschliche Körper aufgrund seiner Federeigenschaften vor allem im Bereich der gesamten Wirbelsäule imstande ist, die erregenden Schwingwege teilweise abzufangen. Mit zunehmender Frequenz zeigt die Halswirbelsäule Schwingwegvergrößerungen mit einer Resonanzspitze bei 3,5 Hz, um dann wieder abzufallen.

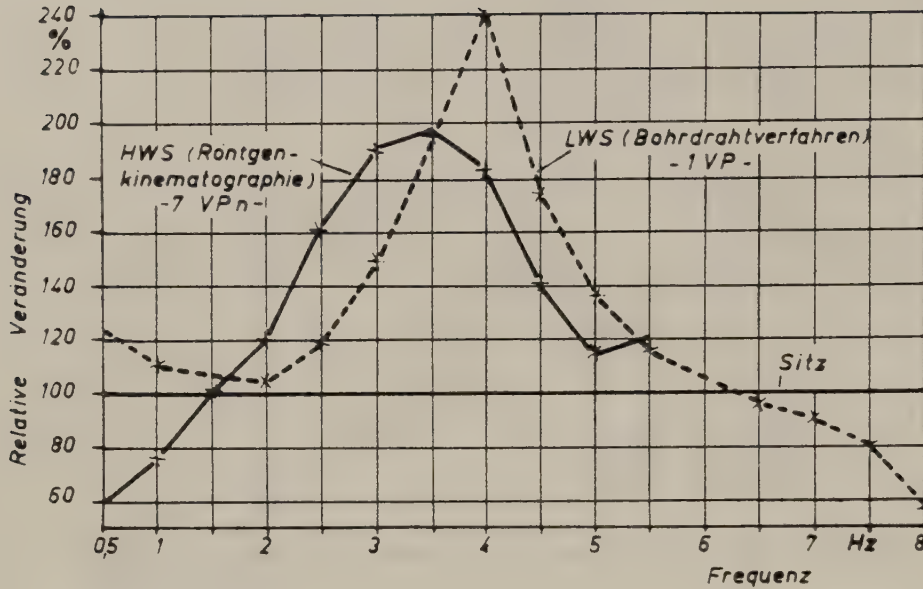


Abbildung 3: Schwingwegveränderungen der HWS und LWS gegen-
dem Sitz
aus DUPUIS (1969)

Abbildung 3 zeigt außerdem, daß die Resonanzkurve der Len-
denwirbelsäule zwischen 2 und 6 Hz am ausgeprägtesten ist
und eine Spitze bei 4 Hz zeigt, wobei der Schwingweg auf 240
% vergrößert wird. Über 6 Hz tritt jedoch eine Schwingweg-
verminderung ein.

Neben der vertikalen Schwingungen entstehen auch noch hori-
zontale Bewegungen, vor allem im Bereich der LWS. Dies kann

am ehesten durch eine cerebelär gesteuerte muskuläre Gleichgewichtsreaktion gedeutet werden.

Zusätzlich können durch eine bestehende Insuffizienz des Muskelapparates skoliotische Fehlhaltungen entstehen oder doch in ihrer Entstehung gefördert werden.

Bei allem ist zu beachten, daß sich durch die Stellung, die der Körper während der Schwingungsbelastung einnimmt, Unterschiede bezüglich der Beanspruchung ergeben. So kann der Skiläufer ebenso wie der stehende Benutzer eines Busses durch die Ausnutzung der Beine als Federdämpfungssystem eine wirksame Verminderung der eingeleiteten Schwingungsenergie erreichen. Dies wird ermöglicht durch eine veränderbare Winkelstellung zwischen Ober- und Unterschenkel sowie durch angepaßte Muskelanspannung. Leider gilt diese Aussage nicht für den sitzenden oder liegenden Menschen. In diesen Körperhaltungen verfügt der Mensch über keine Möglichkeiten, sich selbst gegen übermäßige Schwingungsbelastung zu schützen. Betrachtet man die lange Expositionszeiten, denen Berufsgruppen wie z.B. Busfahrer, Traktoristen oder Hubschrauberpiloten ausgesetzt sind, dann sind auch die klinischen Beschwerden im Bereich des Stützapparates bei Angehörigen dieser Berufsgruppen verständlich.

Neben den Wirkungen der Schwingungen auf den Stützapparat bestehen natürlich auch noch Auswirkungen auf die übrigen Körperorgane. So beschreibt DUPUIS (1969) die Reaktion verschiedener Körperorgane bzw. Organsystem auf Schwingungsexposition.

Die quergestreifte Muskulatur reagiert mit vermehrter Muskelarbeit, mit Reflexminderung und einer Ermüdung durch dauernde Korrekturversuche. Wenn der Mensch auf Schwingungen

mit Körperbewegungen reagiert, muß er dafür Muskelarbeit aufwenden. Dies trifft auch für den Fall eines sehr passiven Verhaltens zu, da der Mensch mit Muskelkraft wenigstens versuchen muß im Gleichgewicht zu bleiben. Im Falle von stochastischen Schwingungserregungen, deren Ablauf ja nicht vorhersehbar ist, sondern der zufallsbedingt erfolgt, gibt es keine programmierte Reaktion sondern lediglich ein "Vorspannen" in Form weitgehend statischer Muskelarbeit. Diese Muskelspannung hat den Zweck, die Eigenfrequenz und die Dämpfung des Körpers so zu verändern, daß Resonanzwirkungen weitgehend vermindert werden. Die fortgesetzte reflektorische Korrektur der Körperhaltung hat damit Muskelarbeit zur Folge, die so lange andauert wie die Schwingungsexposition währt. Es liegt somit nahe, Messungen der Muskelaktivität unter Schwingungseinfluß vorzunehmen.

Die meisten Arbeitsplätze, bei denen die Wirbelsäule schädigenden Vibrationen ausgesetzt ist, sind sitzende Arbeitsplätze. Die Schwingungseinleitung erfolgt also hauptsächlich über das Becken und den Steiß in caudo-cranialer Richtung (z-Achse) oder über die Rückenlehne in dorso-ventraler Richtung (x-Achse) direkt auf die Wirbelsäule.

Die Abbildung 4 zeigt das Elektromyogramm (EMG) des musculus erector trunci - Systems in Höhe L 1, L2 in Vergleichsreaktionen auf Sinusschwingungen und stochastische Schwingungen.

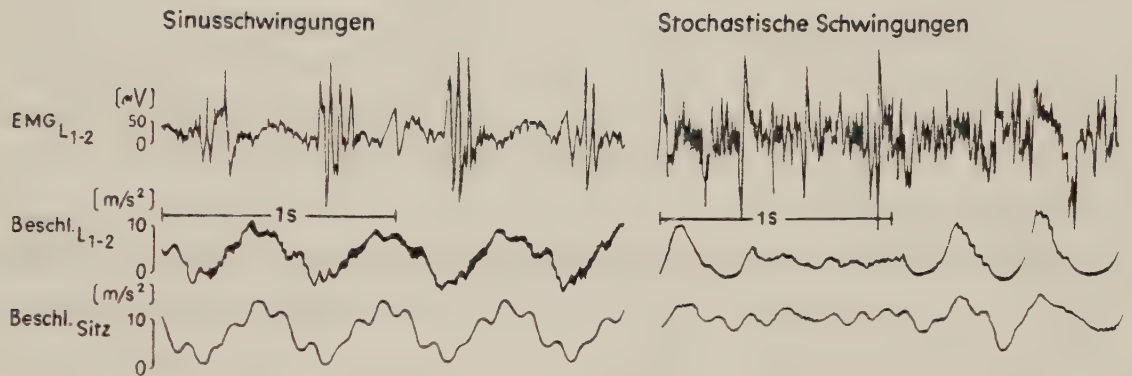


Abbildung 4: Programmierte Muskelreaktion der Lendenmuskulatur auf erregende Sinusschwingungen mit 2,5 Hz (links).

Reaktion der gleichen Muskelgruppe ohne vorliegendes Verhaltensmuster auf erregende stochastische Schwingungen (rechts).

Erklärung: EMG = Elektromyogramm; L1, 2 = Meßstelle in Höhe Lendenwirbel L1 und L 2.

Zusammenstellung aus Bildern von DUPUIS

Das Elektromyogramm der stochastischen Schwingungsbelastung zeigt höhere Amplituden und häufigere muskuläre Aktionen als das Elektromyogramm der sinusförmigen Schwingungsbelastung. Durch die Dauerbeanspruchung ermüdet die Muskulatur relativ rasch und damit wird der Zug des Thorax nach ventral zur kyphotischen Mehrbelastung für die Wirbelsäule, besonders im Bereich der LWS. Innerhalb des Discus intervertebralis wird der Nucleus pulposus nach dorsal verschoben. Das Ligamentum longitudinale posterius, das fest mit dem Anulus fibrosus der Bandscheibe verwachsen ist, wird zusammen mit den Faser-massen des Anulus nach dorsal vorgewölbt. Es entsteht Druck auf die Austrittspunkte der segmentalen Nerven. Daraus resultieren die Rückenschmerzen.

Den Einfluß der Vibrationen auf die Abdominalorgane haben R. u. S. ROSSEGGER in einer Röntgen-Reihenuntersuchung erforscht. Sie stellten bei 76,1 % der untersuchten landwirtschaftlichen Schlepperfahrer nachweisbare Magenveränderungen fest, wobei atonische Gastropnoen besonders gehäuft auftraten. Von 51,2 % der Untersuchten wurden auch subjektive Beschwerden im Bereich des Magens angegeben, die bei 90 % dieser Personen erst während der Tätigkeit als Schlepperfahrer aufgetreten waren.

DUPUIS (1969) stellte als Ergebnis einer röntgen-kinemato-graphischen Untersuchung des Magens mit Kontrastmittel eine Schwingwegvergrößerung des Organs gegenüber der Einleitungs-stelle Sitz fest, die bis zu 100 % betrug.

In der gleichen Arbeit weist DUPUIS darauf hin, daß bei Verwendung eines besser gefederten Sitzes Verminderungen der Schwingwege des Magens um fast 50 % festzustellen sind.

Die oben aufgezeigte Beeinflussung der Muskelaktivität zieht auch einen vermehrten Energieumsatz nach sich.

Darüberhinaus ist durch Schwingungsanregungen der Organe im Abdomen und Thorax eine vermehrte Ventilation zu erwarten. So fand MÜLLER (1939), daß die Atmung stärker als der Energieverbrauch durch Schwingungsbeeinflussung angeregt wird. Zudem konnte ermittelt werden, daß der Energieverbrauch durch in kcal/min der Versuchspersonen unter Schwingungsexposition in starkem Maße von denen durch verschiedene fahrrersitz-bedingten Schwingungen abhängig ist, MÜLLER und FRANZ (1952). Es zeigte sich in Vergleichsversuchen ein bis auf 330 % ansteigender Kalorienumsatz bei Verwendung eines schlecht gefederten Sitzes mit starken Nickschwingungen im Vergleich zu einem gut gefederten, gedämpften und parallelogramm-geführten Fahrersitz.

Der schädigende Einfluß mechanischer Schwingungen auf Sinnesorgane, Psychomotorik sowie auf vegetative Funktionen ist nachgewiesen DUPUIS (1969).

H. RUBLACK (1978) beschreibt die Auswirkungen des Resonanzverhaltens des Körpers wie folgt: "Im Falle der Übereinstimmung der Frequenz des Schwingungserregers mit der Eigenfrequenz einzelner Organe oder Organsysteme kann die Schwingungsintensität am Resonanzorgan die Intensität der erregenden Schwingung übersteigen. Unter diesen Bedingungen ist das Resonanzorgan starken schwingungsmechanischen Belastungen und einem Risiko zur Erkrankung ausgesetzt."

Resonanz bedeutet aber nicht nur in der Technik eine hohe Belastung, sondern bedeutet auch für biologisches Gewebe eine vermehrte Belastung. Besonders trifft das für die Wirbelsäule bei funktionellen Endstellungen der Gelenke, bei

gleichzeitiger schwingungsmechanischer Belastung und vorausgegangener ermüdungsbedingter Insuffizienz des muskulären Abwehrmechanismus zu. Die nachfolgende Tabelle Nr. 3 zeigt die Resonanzfrequenz der verschiedenen Körperbereiche auf.

Körperteil	Körperstellung	Schwingungsrichtung	Frequenzbereich (Hz)
Ganz-Körper	Liegen	X, Z	1 - 2
Wirbelsäule	Sitzen	Z	3 - 4,5
Magen	Sitzen	Z	4 - 7
Magen	Liegen	X	4 - 8
Brustkorb	Sitzen	Z	4 - 6
Brustkorb	Liegen	X	6 - 12
Hand-Arm-System (Ellenb.)	horizont. Unterarm	Z	10 - 20
Augäpfel	Kopf aufrecht	Z	20 - 25
Schädelknochen	Liegen	X	50 - 70

Tab. Nr. 3: Resonanzfrequenzen menschlicher Körperteile
aus: Schäfer et al.(1981)

Als letztes sei in diesem Abschnitt auf die negative Beeinflussung der Leistung durch mechanische Schwingungen hingewiesen. Es ist einleuchtend, daß sowohl die Art der Aufgabentätigkeit am Arbeitsplatz als auch Expositionsdauer und Schwingungsintensität Einfluß auf die Leistungsbeeinträchtigung haben. Es liegen jedoch bisher wenig Erkenntnisse vor, die zu allgemeingültigen Aussagen unter den genannten Wirkfaktoren berechtigen würden.

3.4.3.3 Chronische Wirkungen

Wie bereits oben erwähnt, handelt es sich bei den chronischen Wirkungen um die nach längerer Expositionszeit feststellbaren gesundheitlichen Schäden. Der Nachweis der Kausalität zwischen Ganz-Körper-Schwingungsbelastung und pathologischen Veränderungen der Wirbelsäule ist sehr schwer zu erbringen. Man ist weitgehend auf epidemiologische Untersuchungen an Personengruppen angewiesen, die über längere Zeit beruflich mechanischen Schwingungen ausgesetzt waren.

Es handelt sich bei den chronischen Schäden um Abnutzungsphänomene, die im Sinne einer Alterung des Knorpelgewebes zu interpretieren sind. JUNGHANNS (1979) führt vier Krankheitsbilder auf, die hier im Vordergrund stehen.

- a. die Chondrosis disci --- biomechanisch-trophologenetischer Bandscheibenverschleiß mit intervertebralem Höhenverlust,
- b. die Osteochondrosis disci --- die Bandscheibenzermürbung mit Berührung der jeweiligen Grund- bzw. Deckplatte und konsekutiver Sklerosierung der beiden beteiligten Wirbelkörper,

c) der Diskusprolaps, der durch Massenverschiebungen Nervenreizungen verursacht und eine Palette von Beschwerden hervorruft, die von ischialgiformen Rückenbeschwerden bis zur Parese der unteren Extremitäten reicht.

d) Die Spondylosis deformans --- die Knochenzackenkrankheit, die meist als Folge einer Chondrosis disci auftritt.

Aus der intervertebralen Höhenminderung resultiert eine relative Verlängerung des Bandapparates. Diese hat dann eine vermehrte horizontale Bewegungsfreiheit der Bandscheibe zur Folge. Dadurch treten unphysiologische Druck- und Zugkräfte auf, die zur Knochenneubildung reizen und durch exophytisch wachsende Randzacken die charakteristische Beschwerdesymptomatik hervorrufen.

Das schwächste Glied im System Wirbelsäule ist die Zwischenwirbelscheibe. Sie ist bis zum Ende des zweiten Lebensjahres vacularisiert. Dann veröden die einsprossenden Kapillaren. Das Knorpelgewebe wird jetzt nur noch per diffusionem ernährt. Das scheint mit der Grund dafür zu sein, daß die Zwischenwirbelscheibe zu den am schnellsten alternden Geweben des Körpers gehört. Die Diffusion erfolgt von den Kapillaren der Deckplatten der benachbarten Wirbelkörper her. Zug bzw. Entlastung in Richtung der z-Achse erleichtern den Säfteinstrom. Druck in allen drei Richtungen des Raumes führt zu mehr oder minder partiellem Auspressen des Gewebes. JUNG-HANNS sagt: "Die Bandscheibe lebt von der Bewegung". Vibrationen scheinen in diesen Diffusionsprozeß einzugreifen.

Leider wurde das Verhalten der Kapillaren der Wirbelkörperabschlußplatten noch nicht so gründlich untersucht, wie z.B. das vasospastische Syndrom der oberen Extremitäten bei Ar-

beitern, die langanhaltenden Vibrationsbelastungen ausgesetzt waren (vgl. WOELKE-SEIDL (1982)). Endgültiges darüber auszusagen, ob es rein degenerativ-vasale oder nervös-vasale Initialschädigungen sind, bleibt vorerst noch versagt.

Die meisten Autoren gehen davon aus, daß der Pathomechanismus wie folgt aussieht:

Durch langanhaltende Vibrationsbelastung scheint eine Stase im Diffusionsstrom einzutreten. Durch die häufigen, schnellen Wechsel von Zug und Druck werden die Diffusionssäfte im Bereich der Grenze des Discus intervertebralis und der Wirbelkörperabschlußplatte hin- und hergeschoben, ohne in die Tiefe des Bandscheibengewebes zu gelangen (vgl. KRÄMER, J. (1973)). Es entsteht "die Stoffwechselnot der Bandscheibe", wie JUNGHANNS es nennt. Dieser Ernährungsmangel führt zu Austrocknung, Haarrissen, Teilzerreißungen der inneren Anulus fibrosus-Fasern und damit zum Druckverlust im Nucleus pulposus und in der Folgezeit zur funktionellen Insuffizienz des Discus intervertebralis. Der irreversible Bandscheibenschaden ist manifest.

Wie bereits oben erwähnt, stützen sich die Erkenntnisse bezüglich der Morbidität der Schwingungsexponierten auf epidemiologische Untersuchung mit nicht vibrationsbelasteten Kontroll-Kollektiven.

So führten WITT und FISCHER (1980) eine vergleichende Untersuchung an Jet- und Hubschrauberpiloten der Bundeswehr durch. Im Jet treten Vibrationen nur beim Kontakt mit der Rollbahn und bei taktischen Hochgeschwindigkeitsflügen in niedriger Höhe auf. Beim Hubschrauber dagegen ist die Besatzung ununterbrochen den Schwingungen der Rotoren ausgesetzt, die Frequenzen zwischen 3 und 6 Hz verursachen. Posi-

tiv korrelierten mit dieser Tatsache die klinischen Beschwerden der Hubschrauberpiloten. Weit an der Spitze aller Krankheitsbilder lagen hier die Lumboischialgien. Da die Vibrationseinleitung über den Sitz erfolgte, wird der der Schwingungsquelle am nächsten liegende Wirbelsäulenabschnitt am heftigsten in Mitleidenschaft gezogen. Somit ist die Schmerzlokalisation mit ein Indiz für die vibrationsbedingte Genese der Lumboischialgien der Rotorflüglerpiloten.

Der Zeitfaktor spielt bei der Entstehung der vibrationsbedingten chronischen Schäden eine entscheidene Rolle. In der gleichen Untersuchung von WITT und FISCHER (1980) wurden Standard-Röntgenaufnahmen der Wirbelsäulen der Probanden ausgewertet. Dabei ergab sich, daß die Zahl der verschleißfreien Wirbelsäulen bei Rotorflüglerpiloten bei einer Belastung von mehr als 1500 Flugstunden signifikant abnimmt. Im Vergleich dazu konnten bei den kaum vibrationsbelasteten Jet-Piloten eine solche Relation von Wirbelsäulenschäden und Flugbelastung nicht hergestellt werden. WITT weist außerdem darauf hin, daß eine Differenzierung der "Verschleißschäden" genannten Erkrankungen eine Häufung von Spondylosen und Osteochondrosen und tiefen Lumbalskoliosen erkennen läßt.

Im Jahre 1982 wurden unter der Leitung von G. KÖHNEN eine umfangreiche Untersuchung bezüglich der Ganzkörperschwingungen auf Erdbaumaschinen bei der Rheinischen Braunkohlen A.G. durchgeführt. Die Untersuchungen zur Erfassung der Schwingungsbeanspruchung gliederten sich in solche zur Erkennung einer Beeinträchtigung des Wohlbefindes bzw. der Leistungsfähigkeit der Exponierten sowie solche zum Nachweis bleibender Gesundheitsschäden und solcher zur Ermittlung allgemeiner medizinischer Daten unter der Arbeitsbelastung.

Zu Beginn der Untersuchung wurde eine Befragung zweier Personenkollektive durchgeführt. Die beiden befragten Kollektive bestanden aus 352 Erbaumaschinenführern, die einer mehrjährigen Ganzkörpervibrationsbelastung ausgesetzt waren und 315 nicht schwingungsbelasteten Arbeitnehmern, bei denen ähnliche Arbeiterschwernisse vorlagen wie bei den Vibrationsexponierten: gleiche klimatische Bedingungen, vergleichbare Lärmbelastung, Arbeitsschwere usw., jedoch keine Ganzkörpervibrationsbelastung oder Belastungsanamnese. Das folgende Bild verdeutlicht in graphischer Darstellung die vorgebrachten Beschwerden der Erbaumaschinenführer im Vergleich zu denen der nicht schwingungsbelasteten Arbeitnehmer.

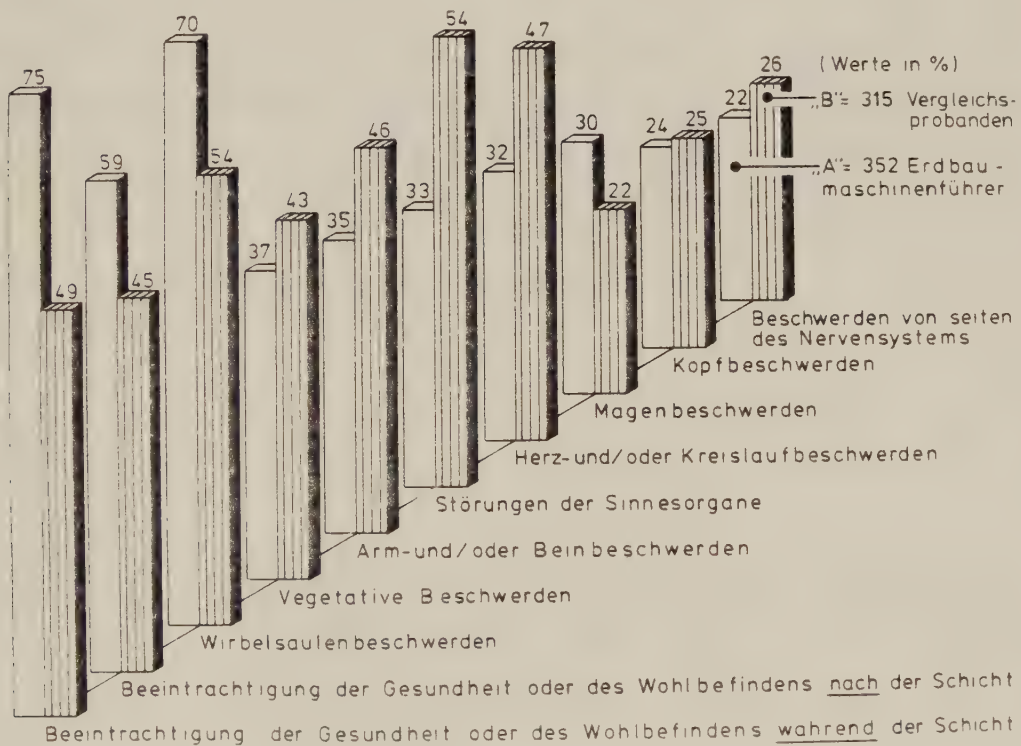


Abbildung 5: Beschwerden von Erbaumaschinenführern im Vergleich zu denen der nicht schwingungsexponierten Probanden aufgrund einer Befragung (aus KÖHNE, Gerhard: Ganzkörperschwingungen auf Erbaumaschinen; Entwicklung geeigneter Dämpfungssysteme)

Besonders auffällig ist der deutlich höhere Anteil der Erdbaumaschinenführer im Vergleich zu den nicht schwingungsbelasteten Arbeitnehmern, die über eine Beeinträchtigung der Gesundheit oder des Wohlbefindens während (75/49 %) und nach (59/45 %) der Schicht klagten.

Von den Erdbaumaschinenführern gaben 70 % Wirbelsäulenbeschwerden bei der Befragung an, im Vergleich dazu betrug der Hundertsatz bei den nicht schwingungsbelasteten Arbeitnehmern nur 54 %.

Bei der Differenzierung der Wirbelsäulenbeschwerden, bei deren Lokalisierung auf einzelne Wirbelsäulenabschnitte durch Schwingungsexponierte und nicht Schwingungsbelastete, gaben 78,7 % der Erdbaumaschinenführer die Lendenwirbelsäule an; die Brustwirbelsäule tritt mit nur 6,8 % vollkommen in den Hintergrund; 18,2 % der Fahrer verlegten die Beschwerden in die Halswirbelsäulenregion.

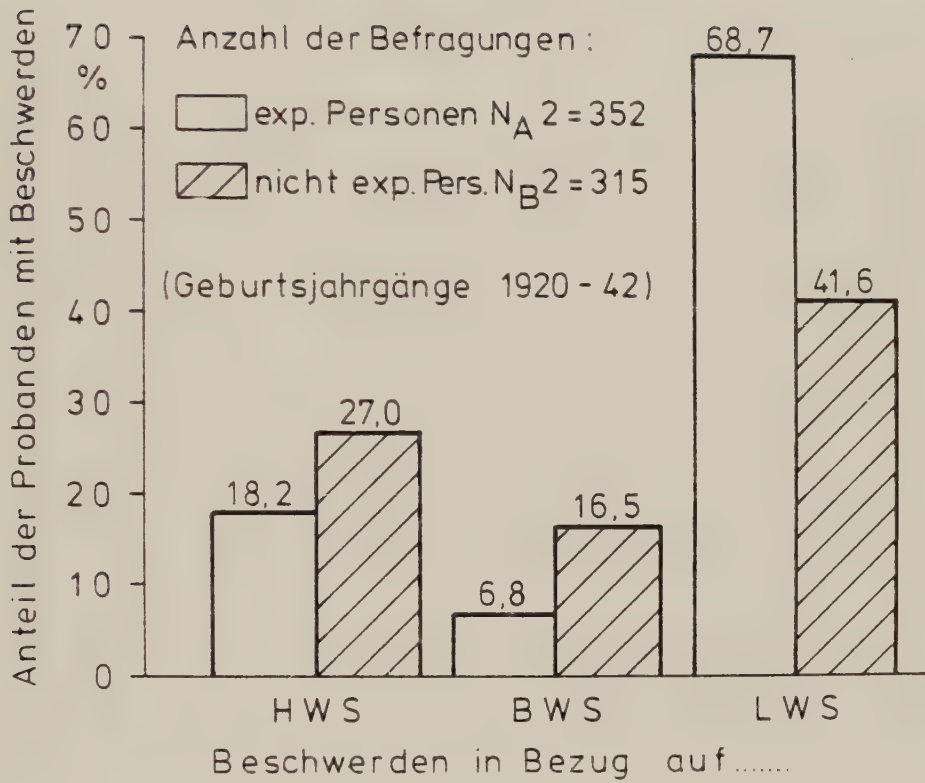


Abbildung 6: Gegenüberstellung der Befragungsergebnisse von Personen mit Ganzkörperschwingungsbelastungen und solchen ohne diese berufliche Exposition
-KÖHNE, G.: Ganzkörperschwingungen auf Erdbau-
maschinen-

Die vorgetragenen Wirbelsäulenbeschwerden, die zu fast 2/3 von den Erbaumaschinenführern auf die Lendenwirbelsäule bezogen wurden, konnten in der epidemiologischen Studie objektiv bestätigt werden. Mit ca. 80 % lag die Diagnose "Lumbalsyndrom" weit an der Spitze aller festgestellten Gesundheitsschäden der Erbaumaschinenführern.

Desgleichen konnte festgestellt werden, daß die röntgenologisch objektiv nachweisbaren morphologischen Veränderungen der Lendenwirbelsäule - im wesentlichen handelt es sich um degenerative Prozesse im Sinne der Spondylosis, Spondylarthrosis bzw. Spondylosteochondrosis - von Erbaumaschinenführern mit einer mindestens 10jährigen Einwirkung von mechanischen Schwingungen in Form der Ganzkörperexposition im Vergleich zu den Nichtschwingungsexponierten zeigen, daß diese Wirbelsäulenveränderungen vorzeitiger und häufiger bei den exponierten Arbeitnehmern manifest werden.

Bild Nr. 7 zeigt in graphischer Darstellung die Häufigkeitsverteilung pathologischer Röntgenbefunde der Lendenwirbelsäule bei ganzkörperschwingungsbelasteten Erbaumaschinenführern unterschiedlicher Altersgruppen mit mindestens 10jähriger Exposition und nicht schwingungsexponierten Probanden im Vergleich zu den Durchschnittswerten positiver Röntgenbefunde der ganzen Wirbelsäule der Gesamtbevölkerung.

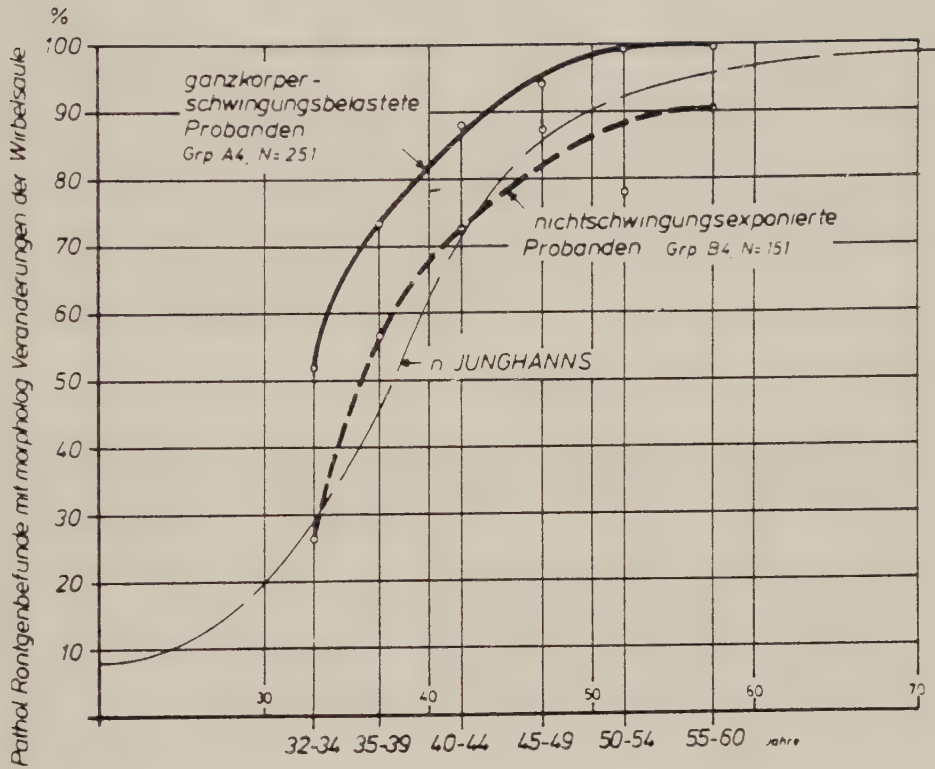


Abbildung 7: Pathologische Röntgenbefunde der LWS bei ganzkörper-schwingungsbelasteten Probanden mit mindestens 10jähriger Exposition und nicht schwingungsexponierten Probanden im Vergleich zu den Durchschnittswerten positiver Röntgenbefunde der Wirbelsäule bei der Gesamtbevölkerung (Aus KÖHNE, G., Ganzkörperschwingungen auf Erdbaumaschinen: Entwicklung geeigneter Dämpfungssysteme)

Die pathologischen Röntgenbefunde der Lendenwirbelsäule der ganzkörperschwingungsbelasteten Erbaumaschinenführer treten im Gegensatz zu den pathologischen Röntgenbefunden der nicht schwingungsbelasteten Probanden, aber auch zu den Durchschnittswerten positiver Röntgenbefunde der Gesamtwirbelsäule (nach JUNGHANNS) deutlich häufiger und wesentlich zeitiger in Erscheinung. Dem Bild Nr.7 ist zu entnehmen, daß z.B. über 50 % des Kollektivs der 32 bis 34jährigen schwingungsbelasteten Erbaumaschinenführer röntgenologisch nachweisbare morphologische Veränderungen der Lendenwirbelsäule aufweisen, während das vergleichbare nicht exponierte Kollektiv nur bei wenig mehr als 25 % der Arbeitnehmer solche Lendenwirbelsäulenbefunde zeigt.

Keine der Röntgenaufnahmen der 55 bis 60jährigen der Erdbau-
maschinenführer wies einen Normalbefund der Lendenwirbelsäule auf. Bei den nicht exponierten Arbeitnehmern waren noch etwa 10 % ohne pathologischen Befund. Zudem treten die morphologischen Veränderungen der Lendenwirbelsäule bei den schwingungsbelasteten Erdbaumaschinenführern zeitlich früher auf als bei dem Kontrollkollektiv. Die zeitliche Vorverlegung beträgt mehr als 5 Jahre.

KÖHNE (1982) weist darauf hin, daß die röntgenologisch nachweisbaren Veränderungen der Lendenwirbelsäule oft das einzig morphologische Substrat des häufigsten Gesundheitsschadens, nämlich des Lumbalsyndroms, bei den Erdbaumaschinenführern sind. Diesen röntgenologisch nachweisbaren Wirbelsäulenprozessen ist daher bei der Beurteilung von arbeitsbedingten Erkrankungen besondere Beachtung zu schenken.

K.J. SCHULZE und Johanna POLSTER (1979) legten eine Untersuchung zum Thema berufsbedingte Wirbelsäulenschäden bei

Traktoristen und Landwirten vor. Dabei wurden 103 Traktoristen mit durchschnittlich 12 Berufsjahren und zum Vergleich 52 Landwirte mit durchschnittlich 19 Berufsjahren klinisch und röntgenologisch auf degenerative Wirbelsäulenerkrankungen untersucht. Die Untersuchungen ergaben, daß bei den Traktoristen solche Erkrankungen 10 bis 12 Jahre früher und häufiger als bei der Durchschnittsbevölkerung auftreten. Die Brustwirbelsäule ist bei der zunehmenden Zahl der Berufsjahre bevorzugt befallen. Bei den Landwirten treten Verschleißleiden der Wirbelsäule etwa 7 Jahre früher und stärker auf als bei der Durchschnittsbevölkerung. Die Lendenwirbelsäule ist am stärksten betroffen.

Als Ursache führen die Autoren einerseits niederfrequente Schwingungen und den dadurch behinderten Pumpmechanismus zur Förderung der Ernährung des Bandscheibengewebes an.

Zum anderen sehen sie in der üblichen, passiven Sitzhaltung mit Totalkyphose, Beckenkipfung nach hinten und einer Hüftbeugung von mehr als 90 Grad die Ursache für eine Minderung der Stoßdämpferfunktion der physiologisch geschwungenen Wirbelsäule.

Zum dritten führt das zwanghafte Sitzen zur vorzeitigen Ermüdung der Rumpfmuskulatur. Damit werden die aktiven Haltemechanismen der Wirbelsäule ausgeschaltet und die passiven Haltemechanismen - Bänder, Bandscheiben und kleine Wirbelgelenke - einer vermehrten Belastung ausgesetzt.

HEIDE (1978) hat das Weltchrifttum auf dem Gebiet der Schwingungsexposition einer zusammenfassenden Auswertung unterworfen und kommt zu der Folgerung "daß Ganzkörperschwingungen im Frequenzbereich 0,1 - 20 Hz ein erhöhtes Risiko für die Wirbelsäule und im Zusammenhang damit für das

periphere Nervensystem darstellen, wenn deren Intensität die Grenzkurve für Gesundheit nach ISO 2631 und VDI 2057 überschreitet".

Die Höhe des Risikos der Erkrankung ist individuell verschieden und daher allgemein nicht beantwortbar.

3.5. Zusammenfassung

Die Belastung des menschlichen Organismus durch niederfrequente Schwingungen ist ein Problem, das die Arbeitsmedizin künftig immer stärker beschäftigen wird. Sowohl durch die Zunahme der Schwingungsquellen als auch durch die volkswirtschaftliche Bedeutung der Vibrationsfolgen in Form des Arbeitsausfalls ist es dringend erforderlich, bessere Präventivmaßnahmen zu entwickeln. Über den Ablauf der Schädigungsmechanismen bestehen noch Unklarheiten. Da im Kollektiv der Normalbevölkerung deutlich weniger vibrationsbedingte Gesundheitsschäden festzustellen sind als im Kollektiv der Vibrationsexponierten, ist es von Interesse, einen Vergleich zwischen der Schwingungsbelastung durch technische Geräte und bei natürlichen Fortbewegungsarten zu erstellen und hierbei auftretende biomechanische und muskelphysiologische Reaktionen zu untersuchen.

4. Experimenteller Teil

4.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

4.1.1 Versuchspersonen

Die praktischen Versuche wurden im Labor des Instituts für Arbeits- und Sozialmedizin der Universität Mainz in Bad-Kreuznach durchgeführt. Die Durchführung der Versuche erfolgte an 15 verschiedenen Tagen in den Monaten Oktober und September 1980. Das untersuchte Kollektiv bestand aus 10 Frauen und 10 Männern im Alter von 17 bis 37 Lebensjahren (s. Tab. Nr. 4). Die leichteste Versuchsperson wog 47 kg bei 156 cm Körperlänge, die schwerste Versuchsperson 90 kg bei 187 cm Körperlänge. Alle Versuchspersonen waren zum Zeitpunkt der Untersuchung gesund. Außer bei Versuchsperson 17 ergaben Anamnese und körperliche Untersuchung keinen Hinweis auf einen Schaden im Bereich des Bewegungsapparates. VP 17 hatte einen durch einen Unterschenkelbruch herrührende Beinverkürzung von 2 cm aufzuweisen. Das Gangbild war jedoch nicht verändert, die Wirbelsäule nicht skoliotisch, der Längenunterschied wurde durch eine Absatzerhöhung des Schuhs ausgeglichen.

Auf Röntgenaufnahmen der Wirbelsäule wurde aus Gründen des Strahlenschutzes verzichtet.

Tabelle Nr. 4: Versuchspersonen

Nr.	Geschlecht	Größe in cm	Gewicht in kg	Alter	Beruf
1	männl.	182	88	30	techn. Zeichner
2	männl.	187	90	29	Student
3	männl.	170	77	37	Ingenieur
4	männl.	176	76	21	Arbeiter
5	männl.	173	66	22	Arbeiter
6	männl.	185	70	22	Arbeiter
7	männl.	178	70	34	Ingenieur
8	männl.	175	56	19	Schüler
9	männl.	185	80	17	Schüler
10	männl.	185	68	18	Schüler
11	weibl.	163	52	27	Hausfrau
12	weibl.	169	55	29	Sekretärin
13	weibl.	157	50	30	Hausfrau
14	weibl.	167	53	28	Hausfrau
15	weibl.	156	47	22	Hausfrau
17	weibl.	166	60	19	Arzthelferin
18	weibl.	175	68	18	Sekretärin
19	weibl.	155	50	25	Hausfrau
20	weibl.	164	58	17	Schülerin

4.1.2 Versuchsaufbau

4.1.2.1 Schwingungssimulator (Versuche Nr. 1 bis 3)

Der Versuchsaufbau gliederte sich in zwei Teile:

Im ersten Teil wurden Schwingungen technischer Großgeräte simuliert. Diese Schwingungen waren in Feldversuchen ermittelt worden und auf Magnetband gespeichert und wurden jetzt über ein elektrohydraulisches System der Fa. Schenck, Typ Hydropuls POZN, zur Steuerung eines Schwingtisches benutzt.

Den drei Durchgängen auf der Hydropulsanlage wurden folgende Schwingungen zugrunde gelegt:

1. Normalfahrt auf Asphaltstraße eines vollbeladenen, luftgefederten Omnibusses der Fa. Daimler-Benz, Typ 0303
K = 10,36 (Mittelwerte)
2. Arbeitsgang eines Radladers, Typ SL 18 c auf unebenem Boden
K = 29,36 (Mittelwerte)
3. gleichförmige Sinusschwinungen mit der Frequenz 4 Hz
K = 27,19 (Mittelwerte)

Während der Versuche, die jeweils zwei Minuten dauerten, wurden die in den Körper der Versuchspersonen eingeleiteten Vibrationen mit Hilfe dreier Schwingungsaufnehmer gemessen. Zusätzlich wurde die myoelektrische Gesamtaktivität des Musculus erector trunci-Systems auf beiden Seiten registriert. Beide Informationsarten wurden auf Magnetband gespeichert.

4.1.2.2 Feldversuche (Versuche Nr. 4 bis 8)

Der zweite Teil des Versuchsaufbaues bestand aus 5 Gehversuchen folgender Art:

4. Treppensteigen auf einer Betontreppe mit normalen Strassenschuhen. Es wurde die aus 18 Stufen mit einer normalen Tritthöhe (ca. 25 cm) und einer Rechtskurve bestehende Institutstreppe benutzt.
5. Gehen auf Asphaltstraßen in Straßenschuhen. Die Gehstrecke betrug 50 m.
6. Gehen auf Asphaltstraße in Holzschuhen. Die Gehstrecke betrug 50 m.
7. Gehen auf Rasen in Straßenschuhen. Die Gehstrecke betrug 25 m.
8. Dauerlauf auf Asphaltstraße in Straßenschuhen. Die Gehstrecke betrug 50 m.

Die Versuche dauerten jeweils zwei Minuten. Dabei wurden die Schwingungen an 3 verschiedenen Körperstellen erfaßt und auf Magnetband gespeichert. Auch während dieser Feldversuche wurde die elektrische Aktivität der Lendenmuskulatur registriert und gespeichert.

4.1.3. Begründung der Programmwahl

Das Ziel der Untersuchungen war ein Vergleich der Schwingungsbelastung durch verschiedene technische Großgeräte und

durch nicht technisch assistierte Fortbewegungsarten und der damit verbundenen Reaktionen.

Wir wählten den Omnibus aus, weil er ein häufig benutztes Fortbewegungsmittel darstellt. Belastungen dieser Art muß also fast jeder Mensch häufig auf sich nehmen. Zudem stellt der Bus ein gut gefedertes, auf Minimalbelastungen hin konstruiertes System dar.

Der Radlader hingegen ist als Arbeitsmaschine wesentlich weniger aufwendig gefedert. Die Schwingungen gelangen also kaum vermindert in den Körper des Fahrers. Es kommt dazu, daß die Bodenbeschaffenheit, auf der sich der Radlader üblicherweise bewegt, von schlechter Qualität ist. Daher sind bei dieser Maschine besonders hohe Schwingungsbelastungen zu erwarten.

Um eine maschinell erzeugte, gleichförmige Schwingungsbelastung darzustellen, setzen wir den Sinus 4 Hz-Versuch an. Obwohl die Schwingungen von erheblicher Intensität waren, erwarteten wir bei gut funktionierender muskulärer Kompensationsarbeit eine deutlich verminderte Belastung der Wirbelsäule. Im Gegensatz zu den beiden vorhergehenden Versuchen handelte es sich hier um gleichförmige, nicht um stochastische Schwingungen.

Bei allen Feldversuchen erfolgte die Schwingungseinleitung in den Rumpf über das Fuß-Bein-Becken-System. Dadurch ist für die Wirbelsäule von vornherein schon eine Minderbelastung zu erwarten, da ein zusätzliches Dämpfungssystem durch die unteren Extremitäten eingeschaltet ist. Beim Treppengehen ist eine mittlere bis hohe Belastung vorauszusehen, da die Überwindung eines Niveauunterschiedes von ca. 25 cm mit Erschütterungen verbunden ist, die diejenigen beim normalen

Gehen übertreffen. Es ist noch zu bemerken, daß vor allem beim Treppenhinabgehen durch das Spreizen des Fußgewölbes unter Belastung ein zusätzliches dämpfendes Element besteht.

Bei den Gehversuchen nahmen wir die Unterscheidung "mit normalen Straßenschuhen" bzw. mit "Holzschuhen" vor.

Die normalen Straßenschuhe lederartiger Konsistenz lassen ein höheres Dämpfungsverhalten erwarten als die Holzschuhe. Die beiden Versuche sollten also Rückschlüsse über die Rolle des Schuhwerkes bei der Schwingungsbelastung geben.

Ähnlich verhielt es sich mit den Gehversuchen auf Rasen. Der weichere Wiesenboden ließ eine geringere Belastung erwarten als der härter beschaffene Asphalt. Leider ergab sich durch unterschiedliche Wetterverhältnisse bedingt, nicht immer die gleiche Beschaffenheit des Wiesenbodens. An Tagen mit heftigen Niederschlägen wurde deshalb auf die Durchführung der Messungen verzichtet.

Als Letztes wollten wir beim Dauerlauf eine besonders hohe Belastung erreichen und zwar sowohl im Hinblick auf die Schwingungen als auch im Hinblick auf die muskuläre Arbeit. Dieser Versuch wurde an das Ende der Versuchsreihe gesetzt, um durch die zu erwartende stärkere Transpiration ein Ablösen der Elektroden und Aufnehmer zu einem früheren Zeitpunkt zu verhindern.

4.1.4 Schwingungsaufnehmer

Die Schwingungen wurden an drei verschiedenen Körperstellen gemessen. Die Meßrichtung erfolgte in der vertikalen Achse.

Bei den Feldversuchen wurde die Schwingungseinleitung am rechten Fuß in Höhe des oberen Sprunggelenkes hinter dem Malleolus fibulae durch einen Aufnehmer, Typ Hottinger B 12, erfaßt. Er hatte ein Eigengewicht von 8 g. Es handelt sich bei dem Aufnehmer um ein Gerät seismischer Bauweise (s. Abb. Nr. 8), das die Trägheit der Masse ausnutzt und nach dem Gesetz $F(N) = m \cdot a$ ($\text{kg} \cdot \text{m/sec}^2$) arbeitet. Während das Gehäuse des Aufnehmers fest mit dem zu messenden Gegenstand verbunden wird - in unserem Falle wurde der Aufnehmer mit einer elastischen Binde an den Knöchel angewickelt - führt die an einer weichen Feder hängende Masse Relativbewegungen dem Gehäuse gegenüber aus. Diese Bewegungen können nach obiger Gleichung in Beschleunigungen umgerechnet werden. Durch die vorausgehende Eichung der Schwingungsaufnehmer mit Null g bzw. zwei g erhält man am Kathodenstrahloszillographen den Bezug, so daß festgelegt werden kann, welche Beschleunigung 1 Volt entspricht. Die Spannung aber ist die zu messende Größe. Die gemessene Spannung ist direkt proportional der Beschleunigung.

Der Hottinger-Aufnehmer ist ein Aufnehmer nach induktivem Prinzip.

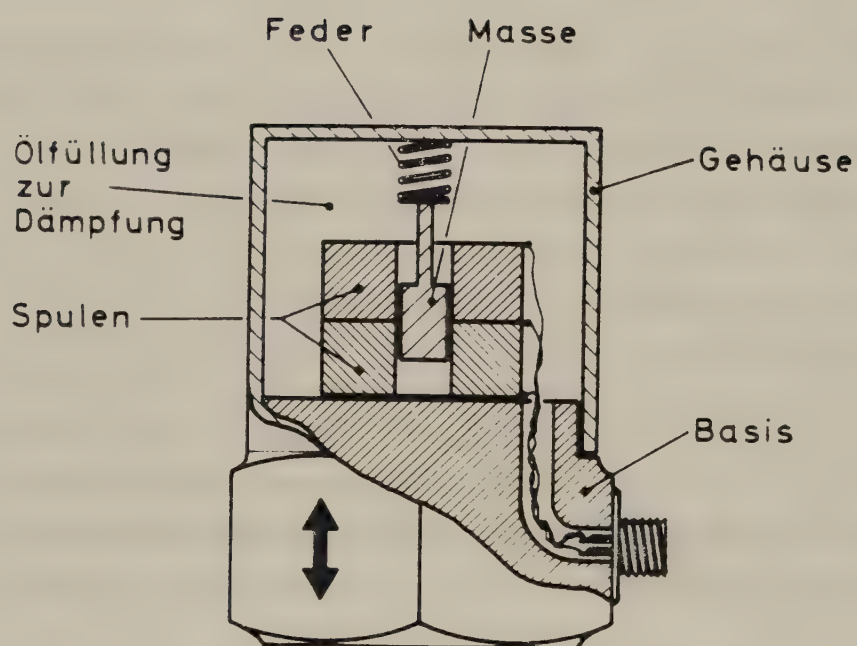


Abbildung 8: Beschleunigungsaufnehmer nach induktivem Prinzip
- nach DUPUIS (1981a) -

An der Wirbelsäule wurden zwei Aufnehmer nach piezoresistivem Prinzip verwandt. Da die Geräte im Bereich der Lendenwirbelsäule und der Halswirbelsäule nicht angewickelt, sondern nur angeklebt werden konnten, war die Gefahr gegeben, daß die Eigenschwingungen die Messungen beeinflussten, so daß der schwere Hottinger nicht verwendet werden konnte. Es wurden deshalb Aufnehmer des Typs 2265 M 12 der Fa. Endevco mit einem Eigengewicht von 2,5 g benutzt. Die piezo-resistiven Aufnehmer sind ebenfalls Geräte seismischer Bauart. Sie wurden durch Doppelkleberinge und zusätzlich durch Pflasterstreifen über den Dornfortsätzen von LKW 4 und HWK 7 befestigt.

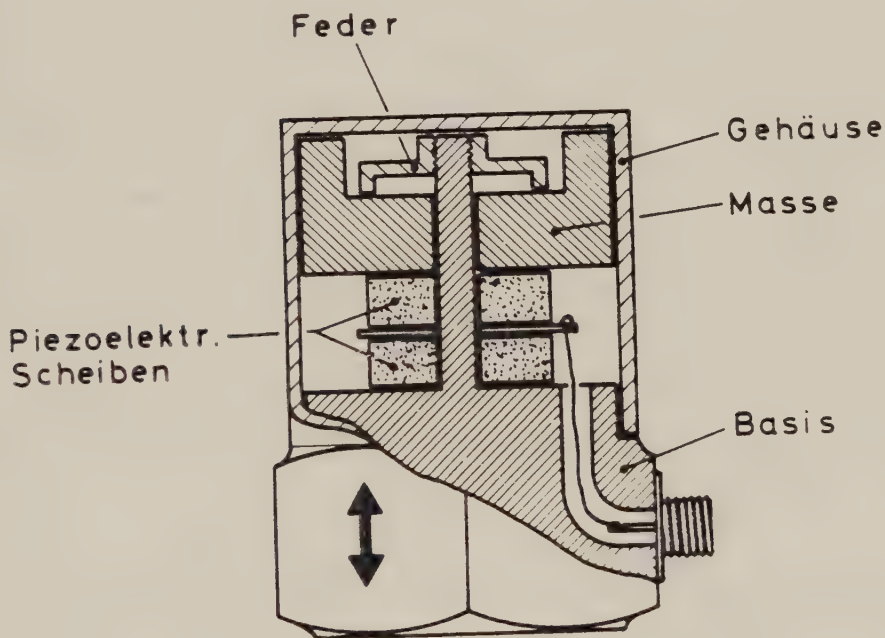


Abbildung 9: Beschleunigungsaufnehmer nach piezoelektrischem Prinzip (Endevco Aufnehmer)
- nach DUPUIS (1981a) -

Da bei den Schwingungssimulatorversuchen die Schwingungseinleitung nicht über das Fuß-Bein-Becken-System, sondern über die Einleitungsstelle Gesäß erfolgte, wurde als dritte Aufnehmerart eine 20 cm durchmessende und 1,5 cm dicke Meßscheibe als Aufnehmer benutzt, die direkt auf den Sitz des Schwingungssimulators gelegt wurde. Es handelt sich auch dabei um einen eingebauten Beschleunigungsaufnehmer seismischer Bauart nach induktivem Prinzip.

Bei jeder Versuchsperson erfolgte vor Beginn der Messung die Eichung der Schwingungsaufnehmer zur Festsetzung des Bezugsniveaus. Die Schwingungsaufnehmer liefern Spannungsimpulse in Volt. Die müssen auf Beschleunigungen in m/sec^2 umgerechnet werden. Daher muß am Anfang festgelegt werden, welche Beschleunigung 1 Volt entspricht. Die Spannungsschwankungen sind der Beschleunigung direkt proportional. Die Eichung ging folgendermaßen vor sich: Der Schwingungsaufnehmer wurde seitlich auf die Erde gelegt. Dabei wurde die an einer Blattfeder aufgehängte Masse "m" durch die Gravitationkraft erdwärts ausgelenkt. Diese Auslenkung entspricht 1 g -

9,81 m/sec^2 . Danach wurde der Aufnehmer um 180 Grad gedreht. Die Masse wurde nun in die entgegengesetzte Richtung erdwärts ausgelenkt. Der dabei zurückgelegte Weg führte sie über die Ruhelage wiederum zu einer Auslenkung, die 1 g entspricht. Demzufolge ergibt die zweite Position ein Bezugsniveau das 2 g entspricht.

Die Meßsignale wurden den Meßverstärkern mittels einer Kabelverbindung zugeführt.

4.1.5 Elektromyographie

Einer der Abwehrmechanismen des menschlichen Körpers gegen einwirkende Schwingungsbelastung besteht in muskulärer Kompensationsaktivität. Daher war es von großem Interesse, die jeweilige muskuläre Reaktion auf eine bestimmte Schwingungsbelastung zu quantifizieren. Als geeignete Methode zur Erfassung der Muskelarbeit bot sich die Myographie an.

Als Ableitungsort für die Messung der elektrischen Potentialschwankungen wurde das Muskelsystem des M. erector trunci im Bereich beidseits der LWS ausgewählt. Da die Belastung der Wirbelsäule im Bereich der LWS ein Maximum erreicht, ist hier auch die muskuläre Reaktion am heftigsten.

Für unsere Versuche erschien uns die Ableitung mit Oberflächenelektroden am geeignetesten. Die Benutzung von Nadel-elektroden hätte es zwar gestattet, durch genauere Lokalisation eine bessere Differenzierung der myozellulären Aktivität vorzunehmen; die Methode hatte aber den Nachteil, daß sie sehr aufwendig und vor allem zu invasiv war (Cave Infekt!). Zudem ist die Oberflächenableitung immer dann vorzuziehen, wenn - wie in unserem Fall - die Reaktion einer größeren Muskeleinheit zu messen ist. Durch die Größe der Elektroden, die einen Durchmesser von 2,5 cm haben, ist es möglich, die Potentialschwankungen nicht nur einer oder einiger weniger, sondern einer ganzen Gruppe motorischer Einheiten abzuleiten. Es wurden Silberelektroden instituts-eigener Bauart verwendet. Die Befestigung erfolgte in der üblichen Weise durch Doppelkleberinge, Elektrolytpaste und zusätzlich durch einen Pflasterstreifen. Um die Leitfähigkeit der Haut zu verbessern, wurde die Ableitungsstelle vorher gründlich mit Waschbenzin gereinigt. Auf Isoprophylalkohol wurde bewußt verzichtet, da der Alkohol der Haut Wasser

entzieht und somit die Leitfähigkeit herab und die Eingangs-impedanz heraufsetzt.

Da die Signale im Bereich von Milli-Volt lagen, wurden EMG-Verstärker eingeschaltet.

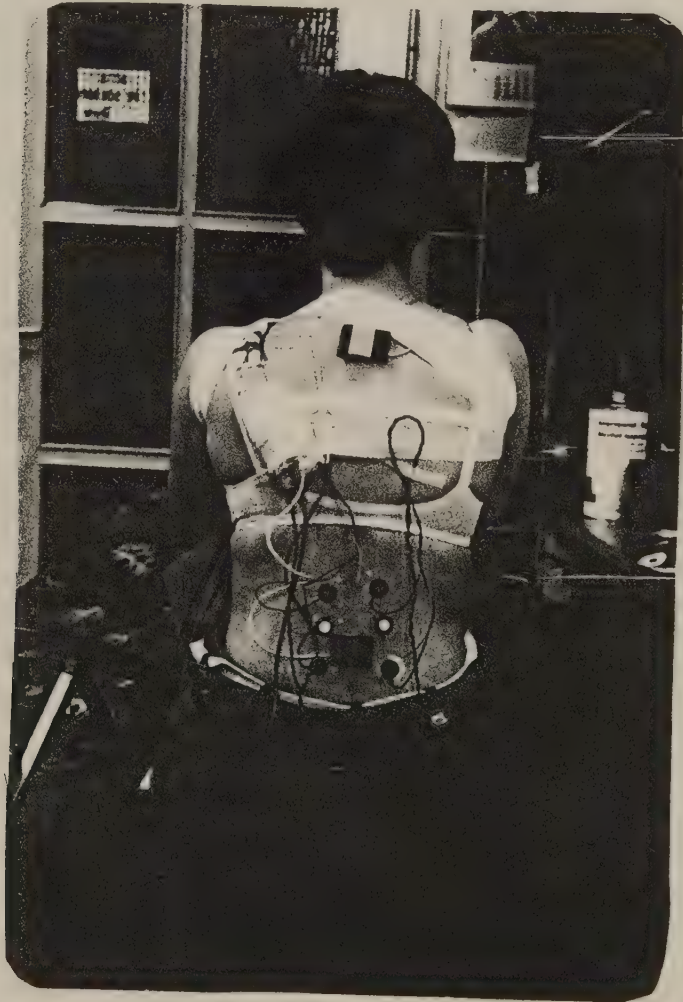


Abbildung Nr. 10: VP mit angelegten Schwingungsaufnehmern
EMG-Elektroden.

4.1.6 Meßwagen

Die drei Kabelverbindungen, der Schwingungsaufnehmer und die zwei Kabel der EMG's wurden durch eine elastische Binde an der linken Schulter zusammengefaßt und befestigt. Von dort verlief der ca. 30 m lange Kabelbaum zum Meßwagen. Auf dem ca. 1,5 m² großen Wagen befanden sich folgende Geräte:

- 1 frequenzmodulierter Magnetbandspeicher mit 6 Spuren, Typ Saba MF 6,
- 2 EMG-Verstärker, Typ
- 3 Schwingungsverstärker, Typ
- 2 Oszillographen mit Hochpaßfilter 1 Hz zur Kontrolle der Energieimpulse, Typ
- 1 Mikrophon zur Besprechung der Kommentarspur,
- 1 Stoppuhr.

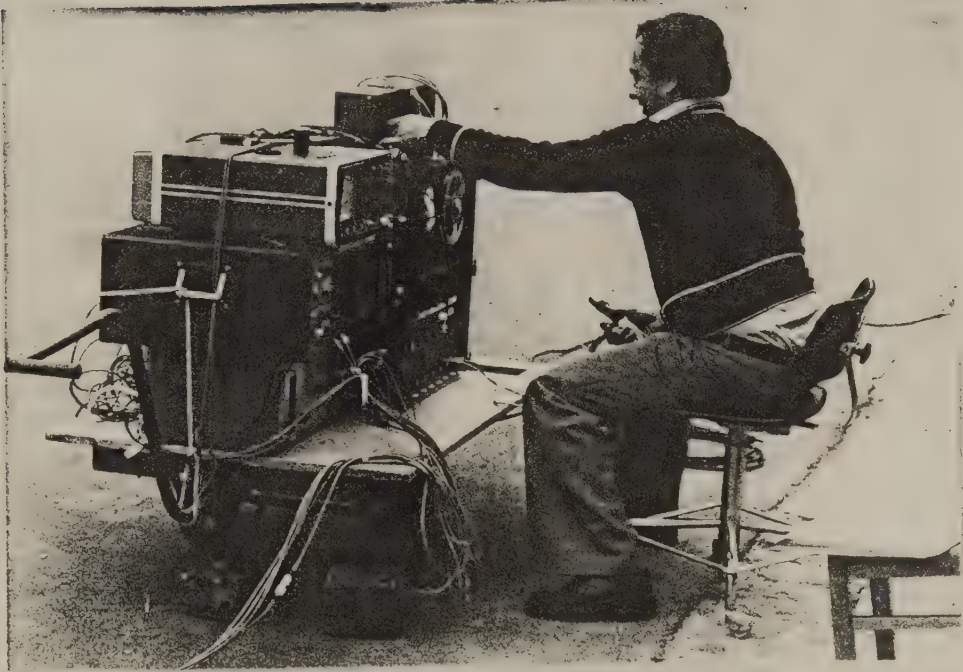


Abbildung Nr. 11: Der Meßwagen

Die Geräte des Meßwagens wurden durch eine Verlängerungs-
schnur mit Energie aus dem normalen Stromnetz gespeist. Bei
den Simulatorversuchen stand der Wagen neben der Hydropuls-
anlage, bei den Feldversuchen wurde er mit ins Freie genom-
men und stand dann in der Mitte der Gehstrecke.

Es erfolgte dann das Eichen der Schwingungsaufnehmer. Dauer: jeweils eine Minute. Anschließend wurde das EMG-Ruhepotential der Rückenstrecker aufgezeichnet. Die Versuchsperson hatte dabei eine Minute ohne Bewegung still zu sitzen.

Nach diesen Vorbereitungen begannen die Simulationsversuche (A 1 - 3). Die Hydropulsanlage simulierte die drei vorgegebenen Programme. Die Dauer der Versuche betrug jeweils zwei Minuten. Nach Beendigung des Sinus-Versuches stieg die Versuchsperson von der Anlage ab.

Es erfolgte nun die Eichung des Hottinger-Aufnehmers am Fuß auf Kanal 3. Dann wurde der Gehversuch beim Treppensteigen (B 1) aufgezeichnet. Zur Durchführung der übrigen Feldversuche (Nr. B 2 - 5) wurde der Meßwagen in den Institutshof geschoben und etwa in der Mitte der Gehstrecke aufgestellt. Um eine einseitige muskuläre Mehrbelastung durch das Ziehen des langen Kabelbaums zu verhindern, ging bei den Versuchen 5 - 8 jeweils eine zweite Person neben den Versuchspersonen und zog das Kabel. Auch die Feldversuche dauerten jeweils zwei Minuten.

Bei unkompliziertem Verlauf war ein Meßdurchgang inclusive Eichung, Aufsuchen der entsprechenden Magnetbandstelle für die Hydropulsanlage und Standortwechsel mit 2,5 Stunden zu veranschlagen. Leider erwies sich die Meßanlage als störanfällig. So wurde ein Teil der Meßdurchgänge durch Kabelbrüche, Ausfall der EMG-Elektroden bzw. der Schwingungsaufnehmer, durch Ausfall des Mikrophons oder der EMG-Verstärker, behindert und durch Instandsetzung verzögert.

4.2. Versuchsauswertung

Die magnetbandgespeicherten Spannungsverläufe für die Schwingbeschleunigungen und die Elektromyogramme wurden auf einem Prozeßrechner PDP 11-40 ausgewertet. Mit Hilfe vorhandener Programme konnten die Effektivwerte und Spitzenwerte der Vertikalbeschleunigung bestimmt werden. Die entsprechenden Verfahren hierfür sind an anderer Stelle, DUPUIS u.a. (1982) beschrieben worden.

Für die Auswertung der Elektromyogramme diente ausschließlich das Verfahren zur Bestimmung des Effektivwertes.

Durch Aufzeichnung konstanter Beschleunigungswerte auf dem Magnetband ($1\text{ g} = 9,81\text{ m/sec}^2$) = Erdbeschleunigung) ließ sich eine Eichung vornehmen: Die in Form von Spannungsschwankungen vorliegenden Elektromyogramme wurden als Spannungswerte analysiert und unter den verschiedenen Belastungsvariationen "normiert", d.h. auf die Muskelbelastung beim Gehen auf Rasenboden bezogen. Die Auswahl der Muskelbelastung unter den Bedingungen des Gehens auf Rasen erfolgte deshalb, weil hierbei eine mittlere Belastung vorliegt.

Die Ergebnisse zum Schwingungsübertragungsverhalten (Abbildung 12 - 19) wurden mit dem Vorzeichentest nach DIXON und MOOD (1946) statistisch geprüft.

4.3 Ergebnisse und Interpretation

4.3.1 Ergebnisse

Die 8 gemessenen Versuchsreihen (Belastungsvariationen) werden in zwei Blöcke unterteilt:

Der Block A umfaßt die simulierten Schwingungsbelastungen

A 1: Schwingungsbelastung im Omnibus

A 2: Schwingungsbelastung auf Radlader

A 3: Schwingungsbelastung durch 4-Hz-Sinusschwingungen

Der Block B umfaßt die Geh- und Laufversuche, also die Versuchsreihen

B 1: Treppe-Gehen

B 2: Gehen mit Straßenschuhen

B 3: Gehen mit Holzschuhen

B 4: Gehen auf Rasen

B 5: Dauerlauf

Von der Vielzahl der Meßergebnisse werden an dieser Stelle die arithmetischen Mittelwerte und Standardabweichungen aus den Einzelwerten für die 20 Versuchspersonen wiedergegeben. Die Abbildung 12 - 15 stellen die Mittelwerte und Standardabweichungen der an den verschiedenen Meßstellen ermittelten Vertikalbeschleunigungen als Effektivwerte und Scheitelwerte dar. In den Abb. 16 - 18 werden die Übertragungsfaktoren von Sitz zu LWS, von Sitz zu HWS und von LWS zur HWS graphisch wiedergegeben. Die Abb. 19 gibt die elektromyographischen Meßwerte wieder, die unter den verschiedenen Versuchsvariationen ermittelt worden sind.

Aus Abb. 14 und 15 läßt sich erkennen, daß unter den gewählten Schwingungsbelastungen in Sitzhaltung (Block A) diejenige im Bus (A1) hinsichtlich des Effektivwertes vergleichsweise am geringsten ist. Die gewählte 4-Hz-Sinusbelastung (A3) folgt an nächster Stelle und wird nur noch durch die höhere Belastung auf dem Radlader (A2) übertroffen. Die Scheitelwerte betragen bei der Schwingungsbelastung auf Radlader und Bus etwa das 4fache unter Sinusschwingungen jedoch nur etwa das 1,4fache.

Bei der Schwingungsbelastung, wie sie durch Gehen und Laufen (Block B) verursacht wird, ergeben sich nach Abb. 12 an der Meßstelle Fuß wesentlich höhere Schwingungsbelastungen. Sie sind mehr als doppelt so hoch im Vergleich zur Schwingungsbelastung auf dem Radlader. Auffällig ist, daß die Schwingungsbelastung beim Dauerlauf (B5) extrem hohe Werte erreicht. Ferner macht die Abb. 12 deutlich, daß die Scheitelwerte die Effektivwerte um mehr als das 4fache übertreffen. Ursache hierfür sind die stark stoßhaltigen Belastungen beim Aufsetzen des Fußes während der Vorwärtsbewegung.

Die Abb. 14 läßt einen Vergleich der Beschleunigungswerte an der Meßstelle LWS nicht nur für die Schwingungsbelastung des Blockes A, sondern auch des Blockes B, zu. Aus diesem Vergleich der Schwingungsbelastungen an der Lendenwirbelsäule läßt sich erkennen, daß die Schwingungen bei den verschiedenen Gangarten immer noch über den Schwingungsbelastungen beim Sitzen auf dem Simulator liegen. Allerdings sind die Unterschiede bereits wesentlich geringer, als diese noch im Vergleich zwischen den Abb. 12 und 13 sichtbar waren. Ursache hierfür sind die stark schwingungsmindernden Eigenschaften der unteren Extremitäten bei den Fortbewegungsarten. Es wird auch hier noch deutlich, daß der Dauerlauf hinsichtlich der Schwingungsbelastung als extrem hoch zu beurteilen ist.

ergibt sich deutlich, daß die Übertragungsfaktoren bei den Schwingungsbelastungen des Blockes A (Schwingungssimulation in Sitzhaltung) über 1,0 liegen. Das bedeutet, daß die Schwingungen vom Sitz bis zur Lendenwirbelsäule vergrößert werden. Diese Schwingungsvergrößerung beträgt unter der Belastung des Radladers (A_2) im Mittel 9 %, unter der Belastung mit Sinusschwingungen A_3 von 4 Hz 41 % und ist in beiden Fällen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit < 1 % signifikant. Dagegen muß die Schwingungsvergrößerung bei der simulierten Omnibusbelastung A_1 von nur 2 % als nicht signifikant angesehen werden.

Demgegenüber unterscheiden sich die Übertragungsfaktoren beim Gehen und Dauerlauf (Block B) deutlich: So läßt Abb. 16 für das Gehen ($B_1 - B_4$) Übertragungsfaktoren zwischen 0,38 und 0,41 erkennen, die mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,1 gesichert sind. Beim Dauerlauf (B_5) ist der Übertragungsfaktor mit 0,72 deutlich höher, jedoch auch statistisch gesichert (< 1 %). Diese Ergebnisse entsprechen Schwingungsverminderungen um 30 - 60 % durch die unteren Extremitäten. Aus diesen Ergebnissen wird quantitativ sichtbar, über welches wirksame Federsystem der Mensch beim Gehen verfügt, während er bei Schwingungsbelastung im Sitzen aufgrund des Schwingungsverhaltens des Rumpfes zur Resonanz neigt.

Die Abbildung 17 betrifft eine ähnliche Darstellung für die Schwingungsübertragung vom Sitz auf die Halswirbelsäule. Die dargestellten Übertragungsfaktoren zeigen unter Sinusschwingungsbelastung von 4 Hz (A_3) eine Vergrößerung um 28 %, die mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit < 1 % gesichert ist. Dagegen konnten die Differenzen der Übertragungsfaktoren unter Schwingungsbelastung des Omnibusses A_1 und Radladers - A_2 gegenüber 1,0 statistisch nicht gesichert werden. Beim

Gehen ($B_1 - B_4$) liegen die Übertragungsfaktoren zwischen 0,30 und 0,37. Die deutliche Schwingungsminderung ist auch hier hoch statistisch gesichert. Diese Aussage gilt auch für den Dauerlauf (B_5), bei dem ein Übertragungsfaktor von 0,59 ermittelt wurde.

In der Abb. 18 ist schließlich das Übertragungsverhalten von der Lendenwirbelsäule bis auf die Halswirbelsäule in Form der Übertragungsfaktoren dargestellt. Hier ergeben sich unter den Schwingungsbelastungen im Sitzen (Block A) keine signifikanten Veränderungen, d.h., daß in den Mittelwerten z.T. erkennbare leichte Vergrößerungen oder Verminderungen statistisch nicht signifikant sind. Dagegen kommt bei den Ergebnissen des Blockes B in allen Fällen des Gehens und Dauerlaufes durch die Übertragungsfaktoren zwischen 0,79 und 0,86 deutlich zum Ausdruck, daß während dieser Fortbewegungsarten in dem genannten Wirbelsäulenabschnitt von der Lendenwirbelsäule bis zur Halswirbelsäule eine weitere Schwingungsminderung um etwa 15 - 20 % eintritt. Diese Ergebnisse sind mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit $< 1\%$ statistisch signifikant.

Von besonderer Bedeutung ist schließlich eine Aussage darüber, mit welcher Aktivität die Rückenstrecker (m. erector trunci) reagieren. Aussagen hierüber können der Abb. 19 entnommen werden.

Wie bereits im Abschnitt 4.2 erwähnt, wurden die in Mikrovolt gemessenen Muskelaktionsspannungen auf der Hautoberfläche "normiert", damit sie zwischen den einzelnen Probanden und zwischen den Versuchsvariationen vergleichbar sind. Als Bezugswert bot sich hierfür eine mittlere Muskelaktivität an, die unter Schwingungsbelastung beim Gehen auf Rasen er-

reicht wurde. Der entsprechende Wert der EMG-Amplitude (Effektivwert) wurde = 100 % gesetzt.

Die Meßwerte in Abb. 19 lassen erkennen, daß die elektrische Aktivität der Rückenstrecker linksseitig und rechtsseitig ähnlicher Tendenz folgt. Es ist auffällig, daß die elektrische Aktivität unter den simulierten Schwingungsbelastungen im Sitzen Block A weitaus am geringsten ist und sich gegenüber Ruhebedingungen im Sitzen wenig oder gar nicht unterscheidet. Lediglich bei Schwingungsbelastung durch den Radlader zeigt sich in den Mittelwerten eine etwas höhere Muskelaktivität.

Beim Gehen und Dauerlaufen (Block B) erhöht sich die elektrische Aktivität der Rückenstrecker jedoch beträchtlich, wobei diese beim Gehen auf Rasen relativ am geringsten ist und über das Treppengehen, Gehen mit Straßenschuhen, Gehen mit Holzschuhen bis zum Dauerlauf ansteigt. Im Gegensatz zu den simulierten Schwingungsbelastungen, die in sitzender Haltung beim Anlehnen des Rückens an eine Rückenlehne erfolgten, muß beim Gehen und insbesondere beim Dauerlauf eine erhebliche muskuläre Arbeit zur Aufrechterhaltung des Oberkörpers und für die mit der Fortbewegung verbundenen Funktionen aufgebracht werden. Die beim Dauerlauf festgestellten EMG-Werte sind besonders hoch und lassen sich sicher durch die besonders starke Arbeit zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichtes erklären. Insgesamt muß jedoch die Art der Muskeltätigkeit beim Laufen als dynamische Muskelarbeit angesehen werden.

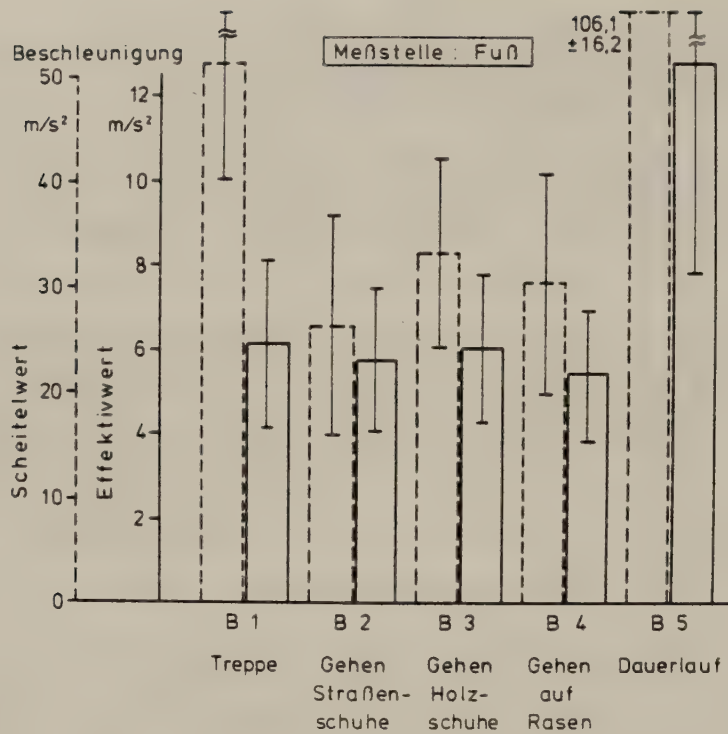


Abbildung 12: Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen der Vertikalbeschleunigung als Effektiv- und als Scheitelwerte (Meßstelle Sitz)

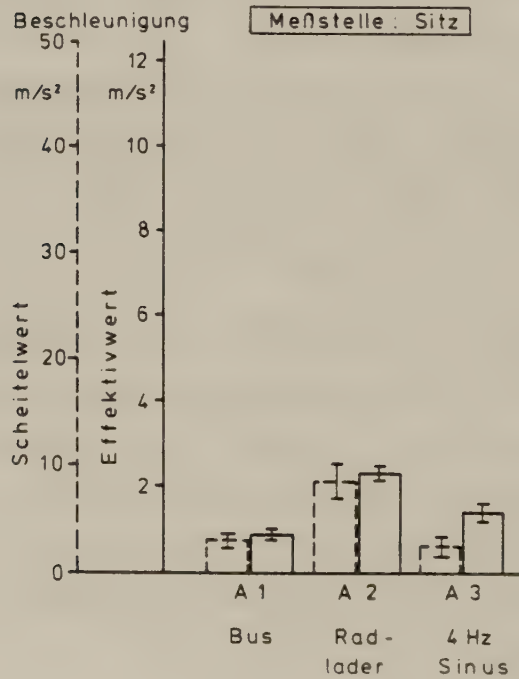


Abbildung 13: Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen der Vertikalbeschleunigung als Effektiv- und als Scheitelwerte (Meßstelle Fuß)

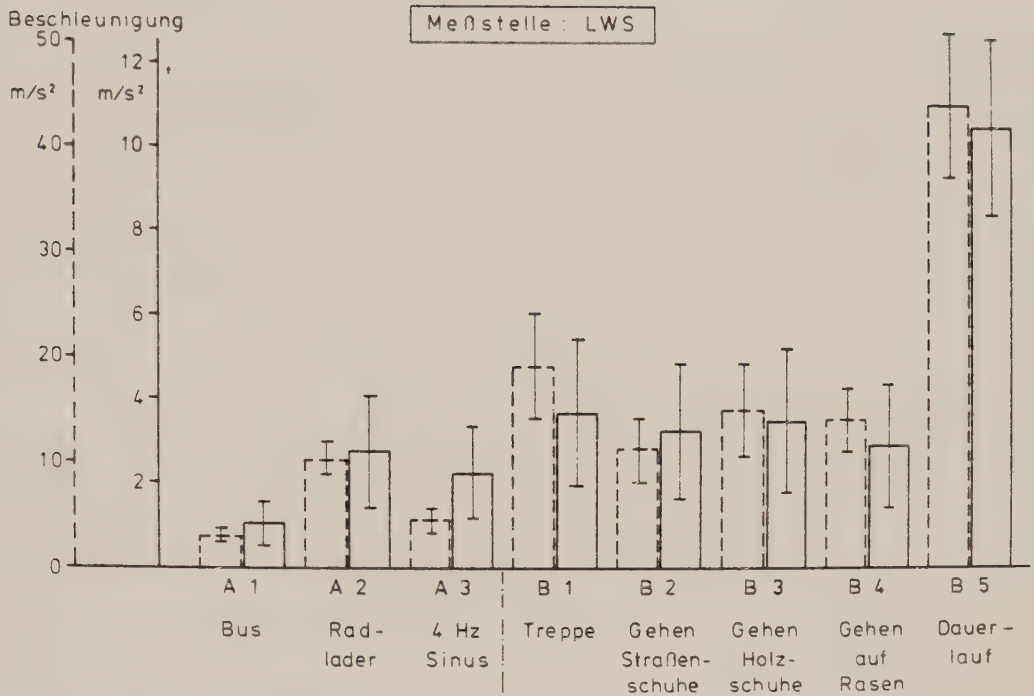


Abbildung 14: Darstellung der Mittel- und Standardabweichungen der Vertikalbeschleunigungen als Effektiv- und als Scheitelwerte (Meßstelle LWS)

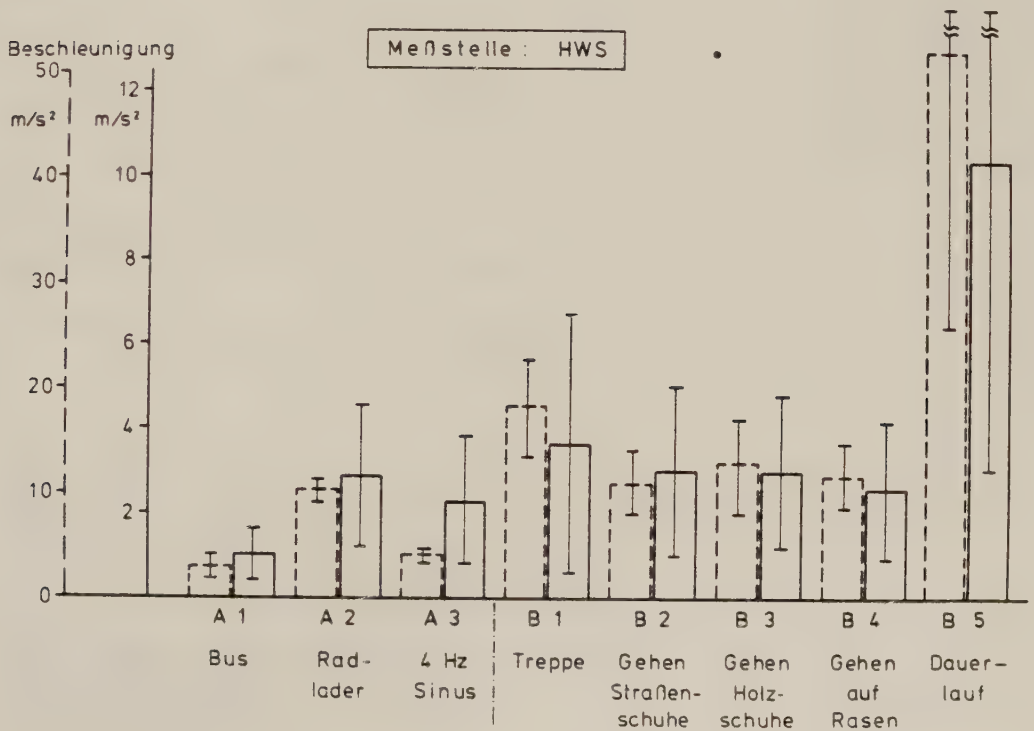


Abbildung 15: Darstellung der Mittelwerte und Standardabweichungen als Effektiv- und als Scheitelwerte (Meßstelle HWS)

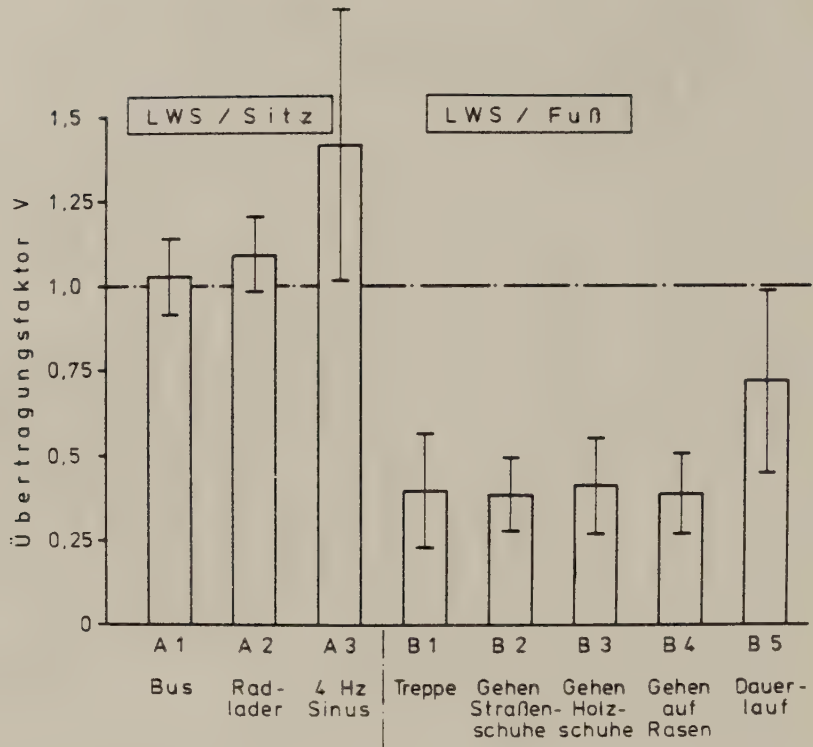


Abbildung 16: Darstellung des Übertragungsverhaltens der Vertikalbeschleunigung zwischen LWS/Sitz und LWS/Fuß

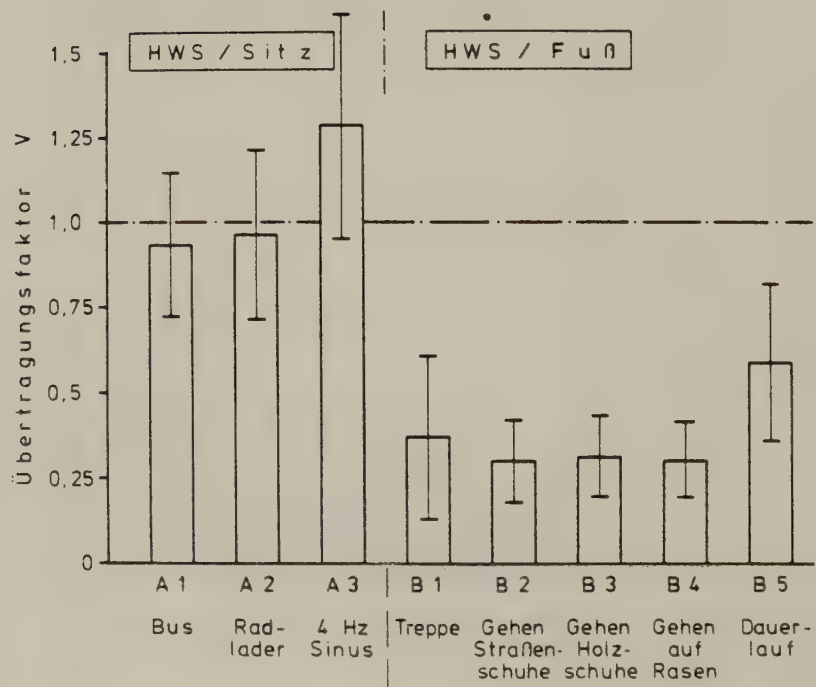


Abbildung 17: Darstellung des Übertragungsverhaltens der Vertikalbeschleunigung zwischen HWS/Sitz und HWS/Fuß

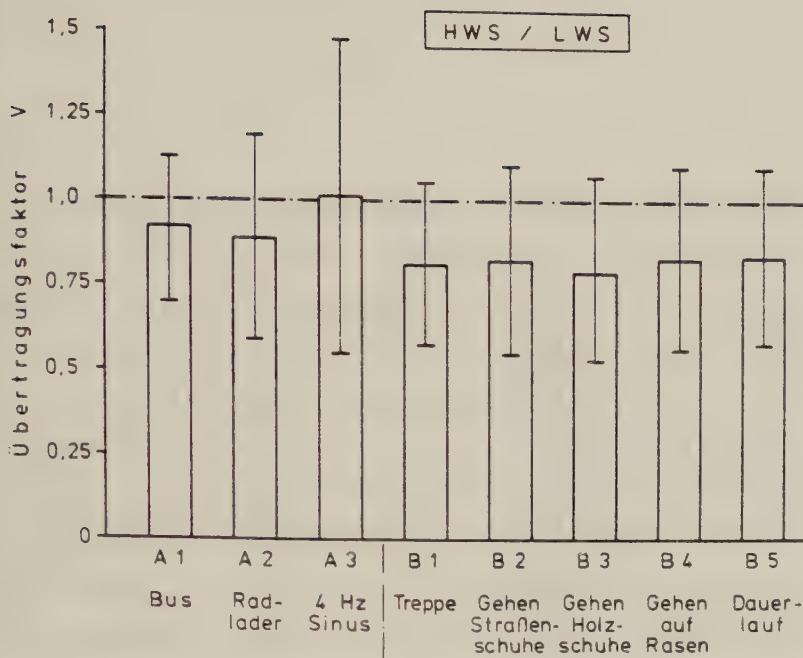


Abbildung 18:
Darstellung des
Übertragungsver-
haltens der Ver-
tikalbeschleuni-
gung zwischen
HWS/LWS

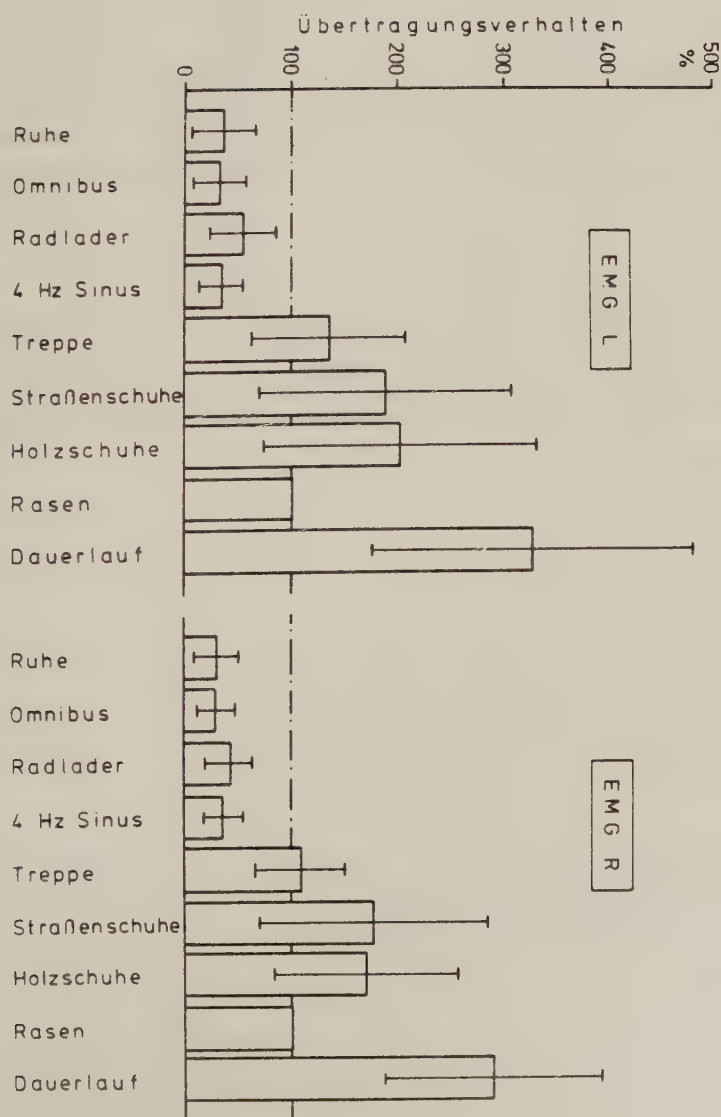


Abbildung 19:
Elektromyographi-
sche Meßwerte
unter verschiede-
nene Versuchs-
variationen

EMG = Elektro-
myogramm

L = links

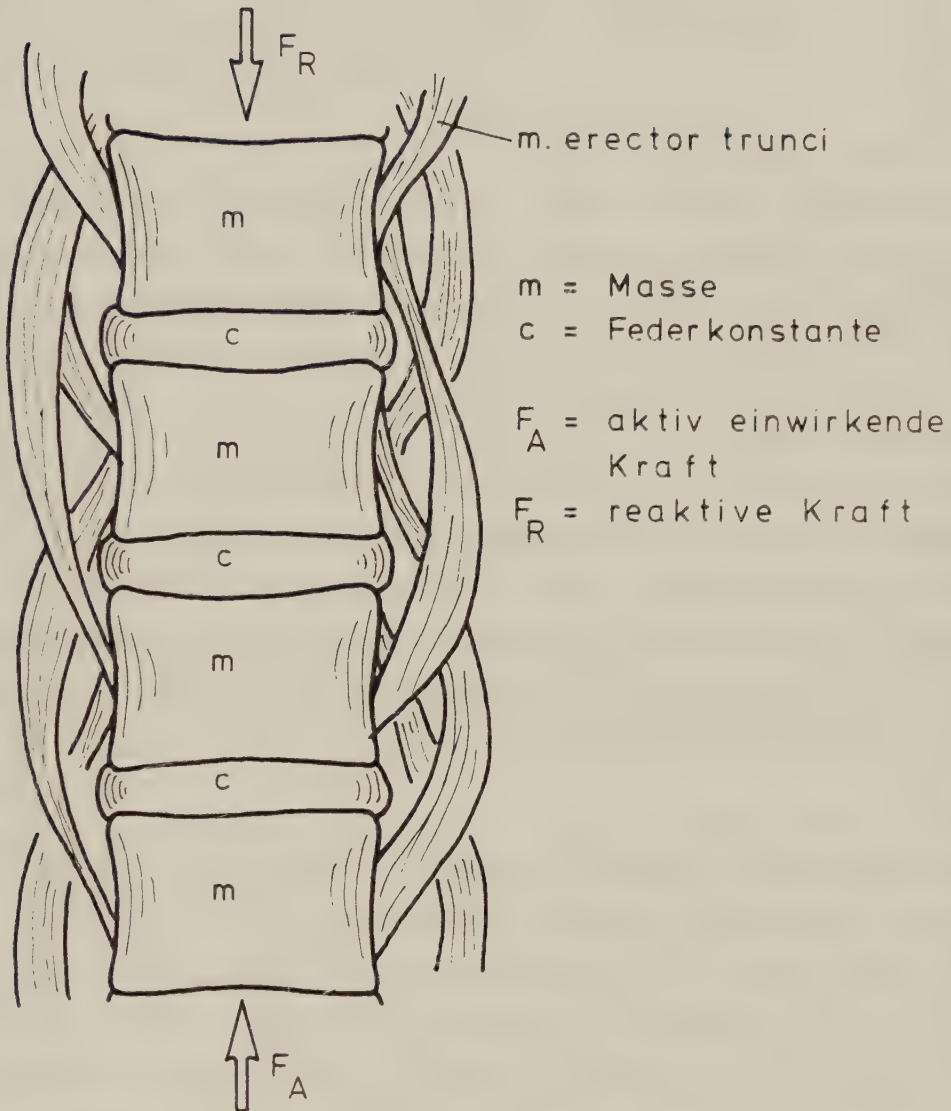
R = rechts

4.3.2 Diskussion

Es mag zunächst überraschen, daß die Schwingungsbelastung an der Einleitungsstelle in den Körper bei den Versuchsvariationen im Sitzen (Block A) eindeutig niedriger liegt als bei den Versuchsvarianten beim Gehen bzw. beim Laufen (Block B). Sie entspricht jedoch in der Größenordnung auch Werten, die von SIMIC (1970), DUPUIS et al. (1975) und BARTON (1981) gefunden wurden. Zusätzlich ist zu bemerken, daß die Schwingungsbelastung bei den Versuchen des Blockes B noch höher liegen muß als an einem Fuß gemessen, da ja auch durch das andere, nicht mit einem Beschleunigungsaufnehmer ausgerüstete Bein, Erschütterungen in ähnlicher Größenordnung in den Körper eingeleitet werden.

Andererseits weisen verschiedene epidemiologische Untersuchungsergebnisse, HEIDE (1978), KÖHNE (1982) - siehe auch Abschnitt 3.4.3.3 - darauf hin, daß stark schwingungsbelastende Berufe tatsächlich eine höhere Morbidität der Wirbelsäule haben können als die nicht schwingungsbelasteten Tätigkeiten.

Um diese Diskrepanz zu klären ist es nötig, die in dieser Arbeit ermittelten Versuchsergebnisse näher zu interpretieren. Hierzu soll ein physikalisches Denkmodell zur Hilfe genommen werden (Abb. 20)



m = Wirbelkörper
 c = Bandscheibe
zusätzlich Muskelmassen der Rückenstrecker

Abbildung 20: Darstellung eines Wirbelsäulenabschnittes mit den biomechanisch wichtigen Organen bzw. Organteilen

Die Wirbelkörper stellen in ihrer Gesamtheit ein System einzelner Massen dar. Diese Massen sind durch Dämpfungselemente, die Bandscheiben, miteinander verbunden. Durch die elastisch-straften, aber nicht kontraktile Seiten- und Längsbänder, Ligamenta longitudinalia anterius et posterius bzw. Ligamenta interspinalia et supraspinalia, wird dieses Masse-Feder-System zwar als Ganzes relativ stabilisiert, die einzelnen Wirbelsegmente behalten jedoch ihre Schwingungseigenschaften. Wirkt auf dieses locker übereinandergestapelte System einzelner Massen und Federn eine Kraft F_A (aktiv) in Form eingeleiteter Vibrationen ein, so erfährt es eine Beschleunigung. Diese Beschleunigung wird von Segment zu Segment weitergeleitet und nur bei höheren Schwingungsfrequenzen gedämpft. Bei niederfrequenter Schwingungserregung im Bereich zwischen 2 und 7 Hz mit Maximum bei 4 Hz kommt es jedoch im Gegenteil zu einer Beschleunigungszunahme durch das Resonanzverhalten des Rumpfes und seiner Teilbereiche, CHRIST und DUPUIS (1966).

Eben dieses Phänomen der Resonanz wird bei den Versuchsvariationen des Blockes A sichtbar. Die Schwingungsbelastungen am Sitz (Abb. 13) zeigen zwar geringere Werte als die am Fuß beim Gehen (Abb. 12). Unter der Schwingungsbelastung im Sitzen kommt es jedoch im Bereich des Rumpfes zu keinem signifikanten Schwingungsabbau (s. Abb. 16 und 17), sondern zum Teil zu einer Schwingungsvergrößerung durch Resonanz. Dieses ist insbesondere beim Fahren auf dem Radlader und unter Schwingungsbelastung von 4 Hz der Fall. Wie CHRIST und DUPUIS (1966) mit Hilfe der Röntgenkinematographie nachweisen konnten, kommt es während der Resonanzschwingungen der Wirbelsäule zu starken Relativbewegungen zwischen den einzelnen Wirbelkörpern. Die Bandscheiben werden dabei ständig gestaucht und gestreckt. Die Grenzzonen von Grund- und Deckplatte der Wirbelkörper bzw. der *disci intervertebrales* er-

fahren die in 3.4.3.2 beschriebene funktionelle Stase des Diffusionsstromes mit den beschriebenen Folgen. Damit erklärt sich der schädigende Einfluß dieser absolut gemessenen im Vergleich zum Gehen niedrigeren Belastung der Wirbelsäule.

Bei den Versuchsvariationen des Gehens und Dauerlaufes (Block B) hat es sich jedoch gezeigt, daß die unteren Extremitäten ein sehr wirksames schwingungsminderndes System darstellen, so daß von den Füßen bis zur Lendenwirbelsäule und noch stärker bis zur Halswirbelsäule ein erheblicher Schwingungsabbau (um 30 - 70 %) eintritt. Daher erreichen die Effektivwerte der Vertikalbeschleunigung im Bereich der Lendenwirbelsäule und der Halswirbelsäule beim Gehen und bei der Schwingungsbelastung auf dem Radlader bzw. bei Sinusschwingungen von 4 Hz ähnliche Größenordnungen. Die Scheitelwerte der Beschleunigung bleiben aber beim Gehen, die Effektivwerte auch beim Dauerlauf gegenüber der Schwingungsbelastung im Sitzen, deutlich erhöht.

Zur Beurteilung der beiden im Prinzip verschiedenen Belastungsarten nach Block A und Block B müssen ferner die Ergebnisse der durchgeführten elektromyographischen Messungen hinzugezogen werden. Dies geschieht vor allem unter dem Gesichtspunkt, daß der Mensch bei den natürlichen Fortbewegungsarten, die er im Laufe seiner Evolution entwickelt hat, eine Anpassung vorgenommen hat, die sich in vorgeschichtlichen Zeiträumen vollzog und ihren Ausdruck in einem physikalisch und physiologisch optimierten Zusammenspiel von Knochen, Bändern und Muskeln und zentraler, unwillkürlicher- und deshalb effektiver - Steuerung fand.

Auf das oben angeführte physikalische Modell (Abb. 20) bezogen, bedeutet das folgendes: Auf die einwirkende Kraft F_A in

Form der beim Gehen wirksamen Schwingungsbelastung antwortet der Körper mit einer Kraft F_R (reaktiv) in Form der muskulären Kompensationsarbeit. Durch die sehr differenzierten Muskelmassen des M. erector trunci-Systemes einschließlich der Nackenmuskulatur werden die Massen der Wirbelkörper aufeinander gepreßt. Die Dämpfungselemente "Bandscheiben" kommen jetzt zur Geltung und verhindern die ungeminderte Weiterleitung der durch das Gehen verursachten Schwingungen von einem Wirbelkörper zum nächsten (Abb. 18). Durch die muskuläre Fixation des Systems Wirbelsäule als Masse-Feder-System und durch die andersartige Schwingungserregung bei natürlichen Fortbewegungsarten wird eine Resonanz unterbunden. Damit erklärt sich die relativ wenig schädigende Wirkung der, absolut gemessen, höheren Schwingungsbelastung des Blockes B.

Die Meßergebnisse der Elektromyographie am M. erector trunci (Abb. 19) bestätigen die hohe Aktivität dieser Muskelgruppe des Rumpfes beim Gehen ($B_1 - B_4$) und insbesondere beim Dauerlauf (B_5), die im Hinblick auf die Schwingungsbeanspruchung als "Schutzaktivität" aufgefaßt werden kann. Dagegen ist die Muskelaktivität unter Schwingungsbelastung im Sitzen mit angelehntem Rücken (Block A) vergleichsweise sehr gering und kann somit keinen Schutz darstellen. Es wird bei diesen Überlegungen ebenfalls deutlich, wie hoch zum einen ein gut entwickeltes Muskelsystem in seiner prophylaktischen Wirkung einzuschätzen ist, und welche Schäden zum anderen durch die muskuläre Inaktivitätshypotrophie im Gesamtbereich des Bewegungsapparates bei starker Schwingungsbelastung entstehen können.

Unter den untersuchten natürlichen Fortbewegungsarten erreichte der Dauerlauf (B_5) hinsichtlich der Absolutwerte höchste Beschleunigungen. Das bedeutet, daß auch die vorhan-

dene Dämpfungsfähigkeit der unteren Extremitäten, der Rückenmuskulatur und der Wirbelsäule nicht ausreichte, um eine befriedigende Schwingungsverminderung zu erzielen. Damit ist der Dauerlauf ohne Zweifel in Bezug auf die Vibrationsbelastung der Wirbelsäule die schädigendste Variante des Blockes B unter allen untersuchten Versuchsvariationen.

5. Abschließende Betrachtung

Die Untersuchung befaßte sich mit der Belastung der Wirbelsäule durch vertikale Schwingungen. Es handelte sich um einen Vergleich zwischen Schwingungsbelastung durch Arbeitsmaschinen und durch normale Fortbewegungsarten.

Obwohl die maschinell erzeugten Schwingungsbelastungen in ihrer Intensität die durch natürliche Fortbewegungsarten erzeugten Schwingungsbelastungen deutlich unterschritten, konnte doch gezeigt werden, daß sie dem Körper größeren Schaden zufügen.

Diese Tatsache erklärt sich einerseits durch die besseren muskulären Abwehrmechanismen gegenüber den meist rhythmisch verlaufenden Schwingungsbelastungen durch natürliche Fortbewegungsarten und andererseits durch die als Dämpfungselemente eingeschalteten unteren Extremitäten.

Es bleibt das Ziel der Arbeitsmedizin, durch eine weiter zu verbessernde Prophylaxe Schäden durch unphysiologische Schwingungsbelastung zu vermindern.

Literaturverzeichnis

- ANDREEVA-GALANINA, T., ARTAMANOVA, D.: Die Begutachtung der Arbeitsfähigkeit bei Schwingungskrankheit, (russisch) (KSK), G.I.M.L. 98 (1963)
- BAASTRUP, Ch.: On the spinous processes of the soft tissues between them Acta radiol., (Stockholm) 14 78 (1963)
- BARTON, J.C.: Off-Road Maschine, Operator Vibration, Measurement methods, SAE Technical papers, Series: East moving Industry confer., Peoria, Ill., 6-8 (1981)
- BECKER, K.D.: Belastungskriterium für Traktoristen, Arbeitsmed. Forschung aus der DDR, Berlin (1973)
- BENNINGHOFF, GOERTTLER: Lehrbuch der Anatomie des Menschen, Urban u. Schwarzenberg, München-Berlin (1979)
- BYGGHÄLSAN: Erkrankungshäufigkeit in der Schwedischen Bauindustrie, Persönliche Mitteilungen (1971)
- CAPLAN, P.S., FREEDMAN, L.M.J, CONELLY, T.P.: Degenerative joint disease of the lumbar spine in coal miners, Arths. Rheumat. 9, 153 (1966)
- CHRIST, W., DUPUIS, H.: Untersuchung der Möglichkeit von gesundheitlichen Schädigungen im Bereich der WS bei Schlepperfahrern, Max-Planck-Institut für Landarbeit und Landtechnik, Bad-Kreuznach Nr. 52 (1966) u. Med. Welt 19, 1919 (1968)
- CHRIST, W., DUPUIS; H.: Der Einfluß vertikaler Schwingungen auf Wirbelsäule und Magen (Röntgenkinematographische Studien), Zbl. Arbeitsmed., 13, 3 (1963)
- COERMANN; R.: Die Wirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen und seine Arbeitsleistung, Werkstattstechnik, 52, 18 (1962)
- CREMONA, F.: Die Wirbelsäule bei den Schwerarbeitern der Eisen- und Stahlindustrie sowie des Bergbaues, Komm. Europ. Gem., Generaldir. Soz. Angelegenheiten, Dok. Nr. 1911/72 d (1972)

- DUPUIS, H., HARTUNG, E.: Arbeitsphysiol. Untersuchungen zur Belastung von Fahrern auf Rad- und Kettenfahrzeugen durch mech. Schwingungen, Zwischenbericht über den Forschungsauftrag BMVG - InSan I 3871-V-072, Bonn (1972)
- DUPUIS, H.: Zur physiolog. Beanspruchung des Menschen durch mech. Schwingungen, Fortschr. Ber. VDI, Z'Reihe 11, Nr. 7, 1- 168 (1969)
- DUPUIS, H.: Stand der arbeitsmedizinischen Bewertung mechanischer Schwingungen am Arbeitsplatz, in: Zeitschrift für Klinik, Praxis, Forschung und Begutachtung, Stuttgart, Okt. 1980
- DUPUIS, H., BROICHER, H.A.: Servo-hydraulischer Schwingtisch zur Simulierung von Fahrzeugschwingungen., Sonderdr. aus: Automobiltechn. Zeitschrift, 2, Stuttgart (1966)
- DUPUIS, H., HARTUNG, E., HEINZ, M., WEICHENRIEDER, A. Biomechanisches Verhalten, Muskelreaktionen und periphere Durchblutung des Hand-Arm-Systems unter Schwingungsbelastung, Arbeiten aus dem Max-Planck-Institut für Landarbeit und Landtechnik, Heft A-76-2, Bad-Kreuznach (1976)
- DUPUIS, H.: Einwirkungen berufsbedingter Vibrationen auf die WS, in: Die WS in Forschung und Praxis, Band 92, Stuttgart (1980)
- EBERSBACH, W.: Sozialmedizinische Bedeutung d. WS-Syn-drome und des Weichteilrheumatismus Hippokrates, 47, 287 (1976)
- EDER, M., GEDIGK, P: Lehrbuch der Allgemeinen Pathologie und der Pathologischen Anatomie, Springer Verl., Berlin, Heidelberg, New York (1975)
- ELLWANGER, E.: Berufliche Rehabilitation aus der Sicht der Rentenversicherung, Z. Allgemeinmed., 53, 208, (1977)
- FASSBENDER, H.G.: Tierexperimentelle Licht- und Elektronen-optische Untersuchungen über die Entstehung und den Charakter von Vibrationsschäden, Zentrum f. Rheuma-Pathologie, Nr. 7245/34/001, Mainz (1977-1979)

- FREEMAN, K.A.R. (1973), nach NACHEMSON, A.,: Towards a better understanding of lowback pain: A review of the mechanics of the lumbar disc., Rheumatol. Rehabil., 14, 129 (1975)
- GROHER, W.: Kreuzschmerzen und Wirbelsäulenveränderungen bei Kunst- und Turmspringern, Sportarzt, Sportmed., 11, 446 (1969)
- GSCHWEND, N.: Die Bedeutung des Vorzustandes als Ursache von Kreuzschmerzen, Orthop. 1, 141 (1972)
- GUIGNARD, J.C.: Human sensitivity to vibration, J. Sound Vib. 15, 11 (1971)
- GURIN, J.: Analysis of the work of miners regarding its effect on the locomotor system, Egypt. orthop. J. 6, 147 (1971)
- HEIDE, R.: Wirkung langzeitiger beruflicher Ganzkörpervibrationsexposition, Literaturstudie des Zentralinst. f. Arbeitsmed., DDR, Berlin (1977)
- HELD, G.: Elektromyograph. Untersuchungen an der oberen Extremität bei statischer Belastung und Schwingungsbelastung, Diss. Inst. f. Arbeits- und Sozialmed. Univ. Mainz (1979)
- HILFERT, R., KÖHNE, G., TOUSSOINT, R., ZERLETT, G., Probleme der Ganzkörperschwingungsbelastung von Erbaumaschinenführern; in: Zentralblatt für Arbeitsmed, Arbeitsschutz, Prophylaxe und Ergonomie, Bd. 31, Nr. 4/5, 152-155, 199-206 (1981)
- JANKOVICH, J.P.: Structural development of bone in the rat under earth gravity, simulated weightlessness, hypergravity and mechanical vibration, NASA, CR - 1823 (1971)
- JUNGHANNS, H.: Die Wirbelsäule in der Arbeitsmedizin, Teil I und II, Hippokrates, Stuttgart (1979)
- JUNGHANNS, H.: Die Wirbelsäule in der Arbeitsmed., Zeitschrift f. Praxis, klin. Forschung, Prävention, Begutachtung und Rehabilitation, Gentner-Verlag, Stuttgart, Sonderdruck, 10. Jg., Heft 7, 136-138, Heft 8, 157-160, (1975)

- KAHLBACH, W.: Überlastungsschäden der WS - Folge der Evolution, Sonderdruck aus: Orthopädische Praxis, 9, 768-769, Ulzen (1980)
- KEIDEL, W.D.: Lehrbuch der Physiologie, Thieme-Verlag, Stuttgart (1975)
- KELSY, L. u. HARDY, R.J.: Driving of motor vehicles as a risk factor of acute herniated lumbar intervertebral disc., Amer. J. Epidemiology USA, 102, 63 (1975)
- KÖHNE, G., ZERLETT, G. u. DUNTZE, H.: Ganzkörperschwingungen auf Erdbaumaschinen, Schriftenreihe Humanisierung des Arbeitslebens, Band 32, VDI-Verlag, Bundesmin. f. Forschung u. Technologie (1982)
- KRÄMER, J.: Biomechanische Veränderungen im lumbalen Bewegungssegment, Die WS in Forschung u. Praxis, Hippokrates- Verlag, Bd. 58, Stuttgart (1973)
- LEONHARD, H.: Histologie u. Zytologie u. Mikroanatomie des Menschen, Thieme, Verlag, Stuttgart (1974)
- KRÄMER, J.: Biomechanische Veränderungen im lumbalen Bewegungssegment, Die WS in Forschung u. Praxis, Hippokrates- Verlag, Bd. 58, Stuttgart (1973)
- LEONHARD, H.: Histologie u. Zytologie u. Mikroanatomie des Menschen, Thieme, Verlag, Stuttgart (1974)
- LOUYOT, P.: W-Schäden beim Lokomotivheizer, Arch. Molad. prof., 15 (1954),
- MESSERER, O.: Elastizität und Festigkeit von Knochen Cotta, Stuttgart (1880)
- MÜLLER, E.A.: Die Wirkung sinusförmiger Vertikalschwingungen auf den sitzenden und stehenden Menschen, Arbeitsphysiologie 10, 459 (1939)
- MÜLLER, E.A., FRANZ, H.: Energieverbrauchsmessungen bei beruflicher Arbeit und einer verbesserten Respirationsgasuhr, Arbeitsphysiologie, 14, 499 (1952)

- NACHEMSON, A.: The influence of spinal movements on the lumbar intradiscal pressure and on the tensile stress in the annulus fibrosus, Acta orthopædica scandinavica, 33, 183 (1963)
- NÖH, E., BEHNECKE, U.: Der Wirbelsäulenschmerz des Schulkindes, Orth. Praxis, 11, 564 (1975)
- ROSS, E.: angeführt n. RÜBE, v. Schulte (1974)
- ROSEGGER, Rosemarie, ROSEGGER, S.: Arbeitsmedizinische Erkenntnisse beim Schlepperfahren, Arch. Landtechnik, 2, 3 (1960)
- RÜBE, W., SCHULTE, G.A.: Die degenerativen Erkrankungen der WS, Handbuch med. Radiol., Springer, Berlin, Heidelberg, New York 6/2, 1 (1974)
- RUBLACK, H.: Wirkungen mechanischer Schwingungen auf den Organismus, Zeitschr. f. d. gesamte Hygiene u. ihre Grenzgebiete, 9, 24, Holle, Wittenberg (1978)
- SÄMANN, W.: Charakteristische Merkmale und Auswirkungen ungünstiger Arbeitshaltungen, Schriftenreihe "Arbeitswiss. u. Praxis", Berlin (1969)
- SCHLEGEL, K.F.: Orthopädie Enke, Stuttgart (1978)
- SCHÄFER, N., DUPUIS, H., HARTUNG, E.: Schwingungsminde- rung am Arbeitsplatz, Bundesanstalt f. Arbeits- schutz u. Unfallforschung, Forschungsber. Nr. 305, Dortmund (1982)
- SCHULTZE u. POLSTER: Berufsbedingte WS-Schäden bei Trak- toristen und Landwirten, Aus der orthop. Klinik der med. Akademie "Carl- Gustav-Carus", Dresden, Beitrag Orthop. u. Traumat. 26, 7, (1979)
- SIMIC, D.: Beitrag zur Optimierung der Schwingungs- eigenschaften des Fahrzeuges, Physiol. Grundlagen des Schwingungskomforts, Berlin-Ost (1970)
- SONODA, T.: Studies in the strength for compression, tension and torsion of the human vertebra column, J. Kyoto Prof. med., 71, 659 (1962)
- TSUJI, J., TAMAKI, T.: Studies of the intra osseous blood circulation and the bone marrow pressure in human lumbar vertebrae, Internat. Orthopaedics (SICOT), 2, 17 (1978)

WITT, A.N., FISCHER, V.: Vibrationsbedingte WS-Schäden bei Hubschrauberpiloten, Abschlußbericht über den Forschungsauftrag BMVG, InSan I 1075-y-073, Bonn (1980)

WOELKE-SEIDL, E.: Epidimiologische Untersuchung zum vibrationsbedingten vasospastischen Syndrom bei Motorsägeführern, Diss, Institut f. Arbeits- und Sozialmed. Univ. Mainz (1982)

WÜNSCHE, O, SCHEELE, G.: Röntgenreihenuntersuchung an Druckluftarbeitern zur Feststellung von Skelettveränderungen als Folge von Überdruckexposition, Wirtschafts-verlag Bremerhaven, 1976,

Für die Überlassung des Themas und für die intensive wissenschaftliche Betreuung der Arbeit gilt mein ganz besonderer Dank Herrn Prof. Dr. H. Dupuis.

Bei der Sichtung und Auswertung des umfangreichen Materials fand ich immer wieder fachkundige und freundliche Hilfe bei Herrn Dr. E. Hartung, dem ich hier ebenfalls dafür meinen Dank aussprechen möchte.

Desweiteren möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Instituts für Arbeits- und Sozialmedizin der Universität Mainz, insbesondere bei Frau Petri, für die bereitwillige Unterstützung bei der Erstellung der Arbeit bedanken.

Nicht zuletzt danke ich meiner Frau für ihre Geduld und ihre moralische Unterstützung während der langen Zeit des Datensammelns und Auswertens.

Lebenslauf

Ich wurde am 13.03.1951 in Limburg an der Lahn als erster Sohn des Landwirts Karl Dielmann und seiner Ehefrau Käthe Charlotte, geb. Orzessek, geboren. Meine Kindheit verbrachte ich auf dem elterlichen Bauernhof.

1957 wurde ich in die Wilhelmiten-Schule in Limburg eingeschult. 1961 wechselte ich zum altsprachlichen Zweig des Gymnasiums in Limburg über und bestand 1970 an der gleichen Schule das Abitur.

Vom Oktober 1970 bis zum September 1972 war ich Soldat. Ich verließ die Luftlandetruppe als Leutnant der Reserve.

Im Wintersemester 1972/73 nahm ich das Studium der Agrarwissenschaft an der Universität Hohenheim auf, da ich für das Studium der Humanmedizin keine Zulassung bekommen hatte. Zum WS 1973/74 wechselte ich nach Bonn und bestand dort das landwirtschaftliche Vordiplom. Im Sommer 1975 wurde ich in Bonn zum Medizinstudium zugelassen.

Im Frühjahr 1977 bestand ich das Physikum. Nach dem 1. Klinischen Semester wechselte ich von Bonn zur Universität Mainz. Hier legte ich 1978 das I. Staatsexamen ab. Im April 1981 bestand ich das III. Staatsexamen. Im Mai 1981 nahm ich die Tätigkeit als Assistenzarzt an der Chirurgischen Abteilung des Städtischen Krankenhauses in Diez auf und wechselte im Juni 1982 in die Innere Abteilung des St. Vincenz-Krankenhauses in Limburg. Dort bin ich z. Zt. als Stationsarzt der Medizinischen Intensivstation tätig.

1976 heiratete ich die Lehrerin Ursula Klein. 1977 wurde mein Sohn Tobias, 1978 mein Sohn Stephan geboren.

Limburg,

den

14.7.1983



